

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Hodnocení svarových spojů oceli P24
Evaluation of Welded Joints Steel P24

Student: Martin Michalák

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student:

Martin Michalák

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Hodnocení svarových spojů oceli P24
Evaluation of Welded Joints Steel P24

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte vlastnosti oceli P24
2. Proveďte hodnocení svařitelnosti oceli P24
3. Navrhněte možné způsoby svařování této oceli s aplikací pro enegetická zařízení
4. Navrhněte přídatné materiály pro zvolené technologie svařování
5. Navrhněte ověření vlastností svarového spoje a toto realizujte
6. Proveďte diskuzi dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I: Učební texty*. 1. vydání. VŠB-TU Ostrava. 2005. 133s. ISBN 80-248-0870-6

KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty*. 1. vydání. VŠB-TU Ostrava. 2009. 240s. ISBN 978-80-248-2025-5

HRIVŇÁK, I. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vydání. VSAV Bratislava. 1989. 344s. ISBN 80-224-0016-5

ČSN EN ISO 15614-1 *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupů svařování - Část. 1: Obloukové a plamenové svařování ocelé a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Český normalizační institut, 2005

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu

V Ostravě: 20. 5. 2013

Miskalák M......

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35,- užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních a představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská- Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB - TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 a autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20. 5. 2013

Michalák M.

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Martin Michalák

Adresa trvalého bydliště: Mozartova 1799, Frýdek - Místek, 738 01

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MICHALÁK, M. *Hodnocení svarových spojů oceli P24: bakalářská práce*, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2013, 65 s, vedoucí Schwarz, D.

Bakalářská práce se zabývá studiem hodnocením svarových spojů oceli P24, měřením tvrdosti HV10 a vyhodnocením makrostruktury a mikrostruktury svarového spoje. V úvodu je popsána ocel P24, vlastnosti oceli, chemické složení, mechanické vlastnosti a mikrostruktura oceli. Dále v teoretické části navazují creepové vlastnosti P24. Důležitým bodem je svařitelnost oceli P24 a svarové spoje z oceli P24. Jako dodatek k této oceli je uvedena struktura svarového spoje a teplotní režimy svařování. Experimentální část obsahuje měření tvrdosti HV10 a zakreslení výsledků z měření do diagramu. Pokračuje vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury v jednotlivých obrázcích s popisem. V poslední části této práce je provedena diskuze k dosaženým výsledkům a vyhodnocení měření tvrdosti, makrostruktury a mikrostruktury.

Klíčová slova: ocel P24, svařování, tvrdost, mikrostruktura, makrostruktura

This thesis deals with the investigation and evaluation of welded joints of steel P24, measurement of hardness HV10 and evaluation of the macrostructure and microstructure of the weld joint. The introduction describes the P24 steel, steel properties, chemical composition and mechanical properties and microstructure of the steel. Furthermore, the theoretical part is followed by creep properties of P24. An important point is the weldability of steel P24 and welded joints of steel P24. In addition to the steel, the structure of welded joints and temperature regimes of welding are given. The experimental part provides measurement of hardness HV10 and drawing the results of the measurements into a diagram. It continues with the evaluation of the macrostructure and microstructure in each image with a description. In the final part of this work is a discussion of the results obtained and the evaluation of the measurements of hardness, microstructure and macrostructure.

Key words: steel P24, welding, hardness, microstructure, macrostructure

Obsah

	strana
Seznam použitého značení.....	7
1. Úvod	9
2. Charakteristika oceli P24	10
2. 1. Typické vlastnosti oceli P24	13
2. 2. Mechanické vlastnosti oceli P24	18
2. 2. 1 Mechanické vlastnosti oceli P24 při zvýšených teplotách	18
2. 3. Mikrostruktura oceli P24	20
2. 4. Creepové vlastnosti oceli P24	22
2. 5. Charakteristika karbidů, které obsahuje ocel P24	23
3. Svařitelnost oceli P24.....	24
3. 1. Svarové spoje z oceli P24.....	25
4. Struktura svarového spoje	27
5. Teplotní režim svařování.....	30
6. Způsoby svařování oceli P24 s aplikací na energetická zařízení	31
7. Experimentální část	38
7. 1. Metodiky a technologické parametry	38
7. 1. 1. Příprava svarového spoje oceli P24	42
7. 1. 2. Metody přípravy a realizace metalografického šetření	44
7. 2. Hodnocení a realizace experimentálních šetření	45
7. 2. 1. Makroskopické šetření svarového spoje oceli P24	46
7. 2. 2. Mikroskopické šetření svarového spoje oceli P24	47
7. 2. 3. Měření tvrdosti dle Vickerse	55
7. 2. 4. Měření tvrdosti HV10	56
8. Hodnocení a závěr.....	58
9. Seznam použité literatury	59
10. Seznam příloh.....	62

Seznam použitého značení

ZNAČKA	VELIČINA	JEDNOTKA
A	Austenit	[-]
Ac ₁ , Ac ₃	Teploty alotropických přeměn	[°C]
A ₅	Tažnost	[%]
ARA	Anizotermický rozpad austenitu	[-]
C	Cementit	[-]
F	Ferit	[-]
HV10	Tvrdost podle Vickerse	[-]
I	Svařovací proud	[A]
M	Martenzit	[-]
M _f	Konec martenzitické přeměny	[-]
M _s	Počátek martenzitické přeměny	[-]
M ₆ C	Komplexní karbid molybdenu	[-]
M ₇ C ₃	Komplexní karbid chromu	[-]
M ₇ C ₃	Komplexní karbid chrómu	[-]
MX	Karbid, nitrid, nebo karbonitrid obsahující vanad, titan	[-]
R _e	Mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
SK	Svarový kov	[-]
T	Teplota	[°C]
t	Čas svařování	[s]
TIG	Tungest inert gas	[-]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[-]
T _p	Teplota přehřevu	[°C]
TZ	Tepelné zpracování	[-]
U	Svařovací napětí	[V]

v	Svařovací rychlost	[m/s]
Q	Skutečný příkon	[kJ/cm]
η	Účinnost	[-]
ZM	Základní materiál	[-]
111	Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	[-]
121	Svařování pod tavidlem	[-]
141	Oblouková svařování netavící se (wolframovou) elektrodou v inertním plynu	[-]

1. Úvod

V dnešní moderní době je směřován vývoj ocelí tak, aby došlo ke snižování nákladů na výrobu a provoz energetických zařízení. Tyto hlediska vedou k vývoji levnějších ocelí. Samotný vývoj ocelí P24 byl předznamenán potřebou získat nový žárupevný materiál pro výrobu trubek membránových stěn tzv. ultra - super - kritických kotlů. U těchto kotlů došlo k nárůstu teploty výparníku a nebylo zde možné používat ocel s označením 16 Mo 3 (15 020) z důvodu potřeby omezení maximální pracovní teploty a získání nižší žárupevnosti.

Vývoj nových ocelí ukázal nový směr, kterým by měl vývoj směřovat. Například se dnes stále používají nízkolegované oceli, jako jsou například 16Mo3, 13CrMo4-5 a 10CrMo9-10. Z moderních ocelí se jedná o dva typy ocelí, prvním je ocel s označením 7CrWVMoNb9-6 (T/P23) a druhá je ocel s označením 7CrMoVTiB10-10 (T/P24). Ocel P23 byla vyvíjena v Japonsku, ale ocel P24 měla své počátky v Německu. Tyto oceli byly vyvíjeny v devadesátých letech a používali se pro výrobu membránových stěn u kotlů.

Dalším aspektem vývoje oceli bylo z pohledu technologických vlastností získat ocel, která umožňuje svařování bez tepelného zpracování a bez použití předehřevu. Těchto výhod se docílilo snížením obsahu uhlíku pod hranici 0,1 hm. %. Nízký obsah uhlíku u oceli P24 měl být kompenzován přidáním dalších legujících prvků, jako jsou vanad, titan, molybden a bor. Podle dohody s výrobcem se ve všech rozměrových řadách trubek oceli P24, které se používají pro výrobu membránových stěn, nevyžaduje tato ocel dohřev a dokonce ani popouštění po svařování.

Zkušenosti z používáním oceli P24 v dnešní době ukazují, že není bez možností rizika. Jednotlivé bloky membránových stěn se svařují bez následného popouštění. V průběhu svařování a následně ve zkušebním provozu dochází k praskání v oblasti svarových spojů. Jako příklad je možné uvést netěsnosti svarových spojů, které provázeli elektrárnu v Německu při uvedení do prvního provozu. Netěsnostem se nevyhnuli ani dílenské a montážní svary [1]. Na tuto havárii reagovali odborníci a diskutovali o tom, co mohlo způsobit problémy: materiál, příliš vysoké napětí při svařování, přítomnost vodíku nebo vytvrzování svarových spojů.

2. Charakteristika oceli P24

Ocel P24 je nízkolegovaná žárupevná ocel, jejíž hlavní oblast použití je konstrukce membránových stěn kotlů s nadkritickými parametry páry. Jedná se o bainitickou ocel, můžeme ji také nalézt pod dalším označením 7CrMoVTiB10-10 nebo T/P24. V německé databázi můžeme ocel P24 nalézt pod označením 1.7378. Ocel se označuje podle norem ASTM 213 a 335. Ocel P24 je původně německého původu, vychází stejně jako ocel P23 z původního typu oceli 2,25 Cr-1Mo. Byla navržena firmou Vallourec&Mannesmann tubes a je obdobou oceli P23. Pro vývoj ocelí P24 a P23 byla použita ocel 10CrMoVTiB10 - 10 (T/P22). Ocel P24 spolu s ocelí P23 má lepší svařitelnost díky nižšímu obsahu uhlíku. Tímto dochází k ovlivnění náchylnosti ke studeným trhlinám. Pro dosažení dostatečné žárupevnosti je ocel P24 komplexně legovaná prvky jako jsou např. vanad nebo niob, které vytvářejí stabilní karbonitridy typu MX. Chemické složení oceli, které je uvedeno v tabulce 1, zajišťuje žárupevnost oceli až do teplot 560 až 570 °C, na druhou stranu narůst obsahu karbidů v oceli může nepříznivě působit na vlastnosti svarových spojů této oceli. Struktura po základním tepelném zpracování (shodná s ocelí P23) je čistě bainitická a obsahuje karbidy typu $M_{23}C_6$, M_7C_3 a MX. Ocel P24 slouží hlavně k výrobě membránových stěn boilerů pracujících za super - kritických parametrů. Je navržena tak, aby byla vhodná pro svařování metodou TIG; svařování pod tavidlem a pro svařování obalenou elektrodou [2].

		C	Mn	P	S	Si	Cr
Ocel P24	min.	0,05	0,3	-	-	0,15	2,2
	max.	0,10	0,7	0,02	0,01	0,45	2,6

		Mo	W	Nb	V	B	jiné
Ocel P24	min.	0,7	-	-	0,2	0,0015	N: 0,012 max.
	max.	1,1	-	-	0,3	0,0070	Ti: 0,06-0,10

Tabulka 1: Chemické složení oceli P24 podle standartu ASTM 213 [hm. %] [2]

V tabulce jsou uvedeny tyto druhy prvků: uhlík, mangan, fosfor, síra, křemík, chrom, molybden wolfram, niob, vanad a bor a jejich chemické složení v oceli P24 od maximálního obsahu do minimálního obsahu.

Oceli P24 a P23 představují nástupce parametricky nevyhovující oceli P22 (10CrMo9-10), ze které vycházejí. Japonská ocel P23 byla dolegována ještě wolframem, německá ocel P24 titanem. Tyto oceli obsahují jako legující prvek vanad, který tvoří stabilní karbidy či karbonitridy o velice jemné disperzi. Kromě toho vstupují do hry intersciální prvky bor a dusík, které mají rovněž prokázaný příznivý vliv na zvýšení žárupevnosti oceli. Chemické složení oceli T24 (P24) a jejího předchůdce oceli P22, konkurenta P23 a alternativy T91 jsou uvedeny v tabulce 2 [3].

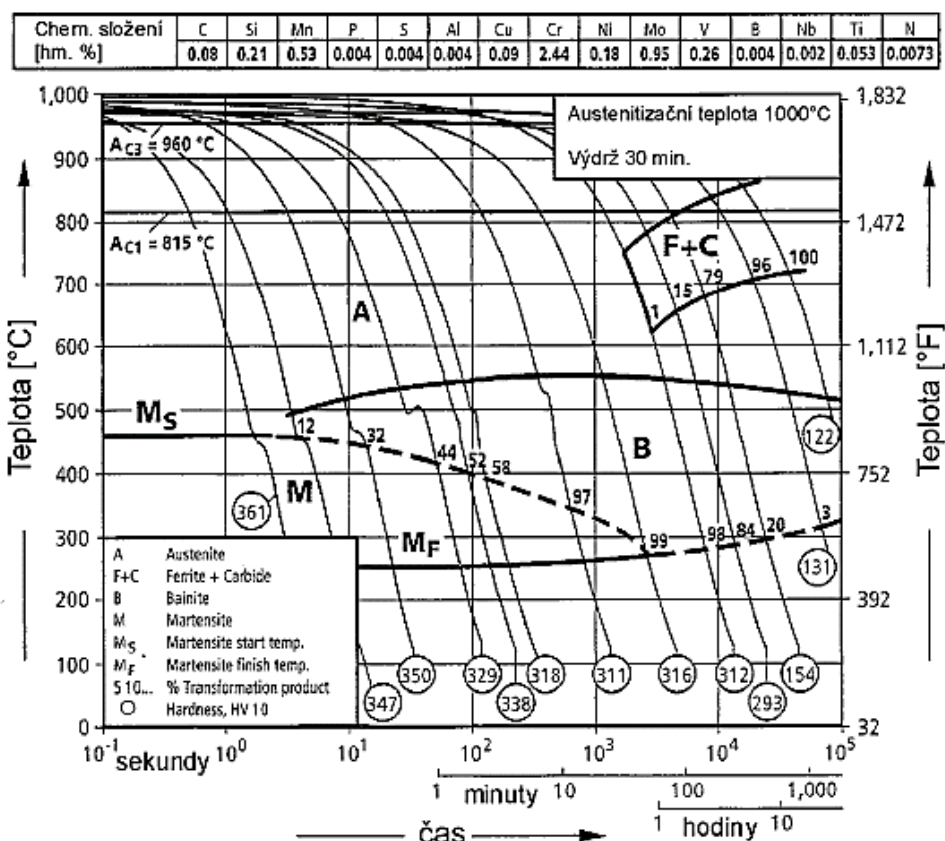
Standard	Oceli	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ti	V	W	Cb	B	N	Ni	Al
ASTM A 213	T22	max. 0.15	0.30 0.60	max. 0.030	max. 0.030	0.25 1.00	1.9 2.6	0.87 1.13	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.	n.s. n.s.
ASTM A 213 (Code Case 2199)	T23	0.04 0.10	0.10 0.60	max. 0.030	max. 0.010	max. 0.50	1.9 2.6	0.05 0.30	n.s. n.s.	0.20 0.30	1.45 1.75	0.02 0.08	0.0005 0.0060	max. 0.030	n.s. n.s.	max. 0.030
ASTM A 213 (Draft)	T24	0.05 0.10	0.30 0.70	max. 0.020	max. 0.010	0.15 0.45	2.2 2.6	0.90 1.10	0.05 0.10	0.20 0.30	n.s. n.s.	n.s. n.s.	0.0015 0.0070	max. 0.012	n.s. n.s.	max. 0.020
ASTM A 213	T91	0.08 0.12	0.30 0.60	max. 0.020	max. 0.010	0.20 0.50	8.0 9.5	0.85 1.05	n.s. n.s.	0.18 0.25	n.s. n.s.	0.06 0.10	n.s. n.s.	0.030 0.070	max. 0.40	max. 0.040

n.s. = not specified

Tabulka 2: Chemické složení žárupevných ocelí T22, T23, T24 a T91 [hm. %] [3]

Filozofie vývoje ocelí P24 sleduje dva základní směry. V první řadě se jedná o zvýšení žárupevnosti oproti konvekčním oceli T22 (2,25%Cr1%Mo). Dalším neméně důležitým cílem je zlepšení svařitelnosti oceli a “úsporné” dolegování oceli P24. Snížení obsahu legujících prvků u oceli P24 na hranici nezbytně nutnou pro zajištění žárupevnosti snižuje hodnotu uhlíkového ekvivalentu a tím i potřebnou teplotu předehřevu při svařování. Z ekonomického hlediska je však požadavek takový, aby bylo možno membránové stěny konstruovat zcela bez nutnosti aplikace předehřevu a pokud možno i bez tepelného zpracování. Mimo to rozměrné membránové stěny vyžadují po tepelném zpracování složité rovnání.

Díky svému chemickému složení, vzniká u oceli P24 bainiticko - martenzitická struktura v širokém rozsahu ochlazovacích rychlostí. Tvrdost oceli P24 se pohybuje okolo 350 HV10 v závislosti na obsahu uhlíku. ARA diagram oceli T24 je na obrázku 1 [3].



Obrázek 1: ARA diagram oceli P24 [3]

ARA diagram oceli P24 má svůj počátek bainitického rozpadu posunutý doleva. Normalizační žhání probíhá zpravidla pro ocel P23 při teplotě $1\,060\,^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ a pro ocel P24 při teplotě $1\,000\,^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. Následné popouštění je pro ocel P23 provedeno v rozsahu teplot $760^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ a u oceli P24 se provádí optimální popouštění při teplotě $750^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ [1].



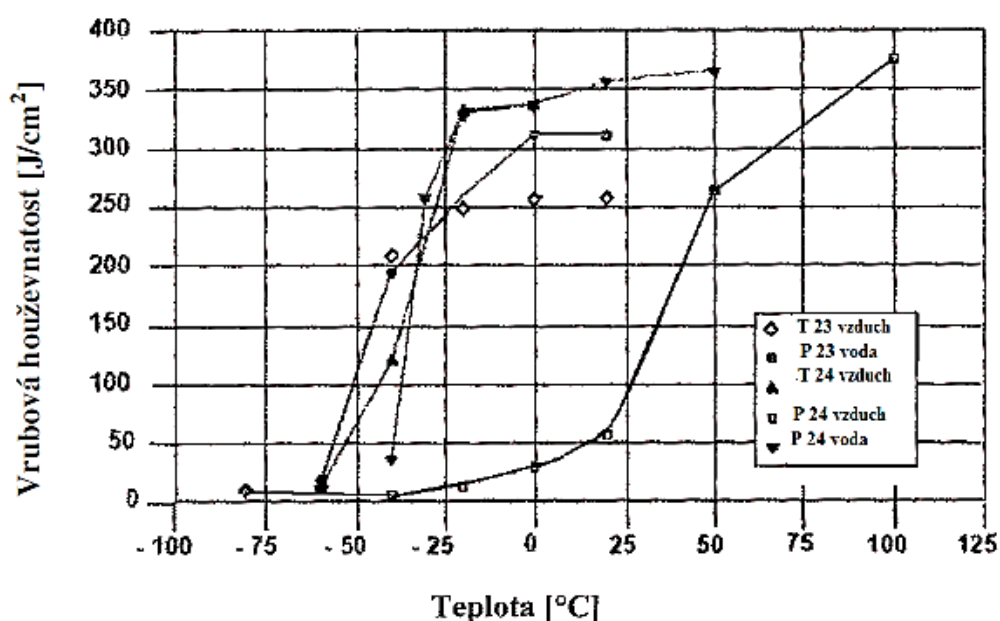
Obrázek 2: Popuštěná bainiticko - martenzitická struktura oceli T24 [3]

2. 1. Typické vlastnosti oceli P24

Mezi vlastnosti oceli P24 patří také její chemické a mechanické složení. Již v předchozím bodě byla tato ocel srovnávána s jinými typy ocelí, ale toto pokračování se zaměří pouze na ocel P24. V předchozím bodě jsme se také dozvěděli, o jakou ocel se jedná, v tomto pokračování bude následovat podrobnější popis oceli P24.

Charakteristickým znakem každého materiálu, hned po jeho označení a názvu, jsou jeho mechanické vlastnosti. Hodnoty mechanických vlastností předurčují materiál na konkrétní použití. Do skupiny mechanických vlastností patří vrubová houževnatost, mez pevnosti a mez kluzu. U žárupevných ocelí je to ještě mez pevnosti při tečení.

V závislosti na rychlosti ochlazování z teploty normalizačního žíhání byl zjištěn posun tzv. Vidalovy - křivky. Tento posun je znázorněn na obrázku 3. Při porovnání ochlazovacích křivek pro různé rychlosti ochlazování z austenitické teploty je možné pozorovat, že nejméně příznivé je ochlazování na vzduchu pro potrubí z oceli P24. V tomto případě se pohybuje okolo teploty 0 °C [1].



Obrázek 3: Závislost vrubové houževnatosti na teplotě pro T23, P23, T24 a P24 [4]

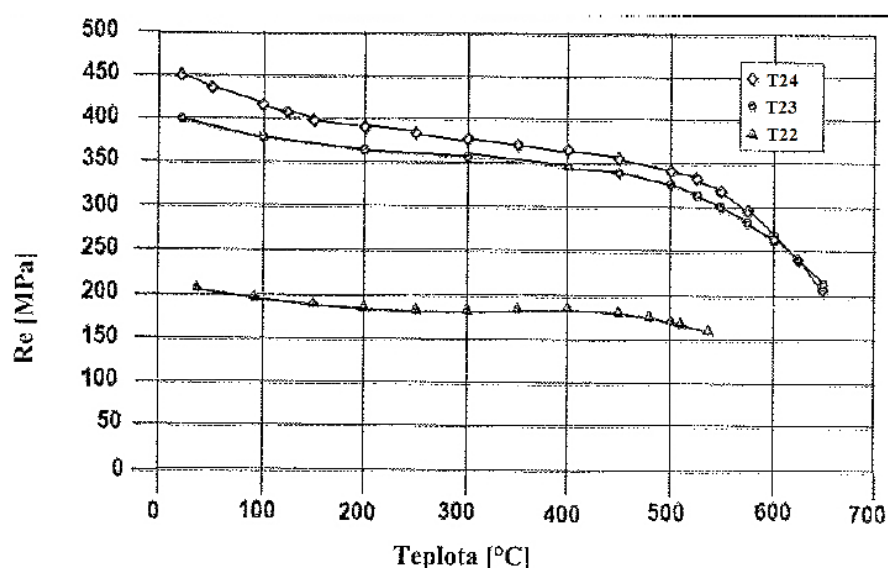
Modifikovaná CrMo ocel P24 je v provozu používána v zušlechtěném stavu. To znamená, že po ohřevu oceli P24 na $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ se polotovary intenzivně ochlazují. Na získání optimálních mechanických vlastností v závislosti na typu rozpadových struktur je nutné při větších hloubkách jako 10 mm používat zrychlené ochlazování z teploty normalizačního žíhání. Díky nízkému obsahu uhlíku, tyto oceli dosahují při rychlém ochlazování z normalizační teploty hodnot tvrdosti maximálně 350 – 360 HV10. Popouštěním v rozmezí teplot 740 - 770 $^{\circ}\text{C}$ se získá mikrostruktura s optimálními mechanickými vlastnostmi. [5]

Porovnáme - li ocel P23 a P24 s ocelí P22, mají tyto oceli výrazně vyšší pevnostní parametry. Porovnání mechanických vlastností je uvedeno v tabulce 3.

Druhy ocelí	Mechanické vlastnosti		
	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]
10CrMo9-10 (T/P24)	min. 280	480-630	min. 20
T/P23	min. 400	min. 510	min. 20
7CrMoVTiB10-10	min. 450	585-840	min. 17
X10CrMoVNb9-1	min. 450	620-850	min. 17

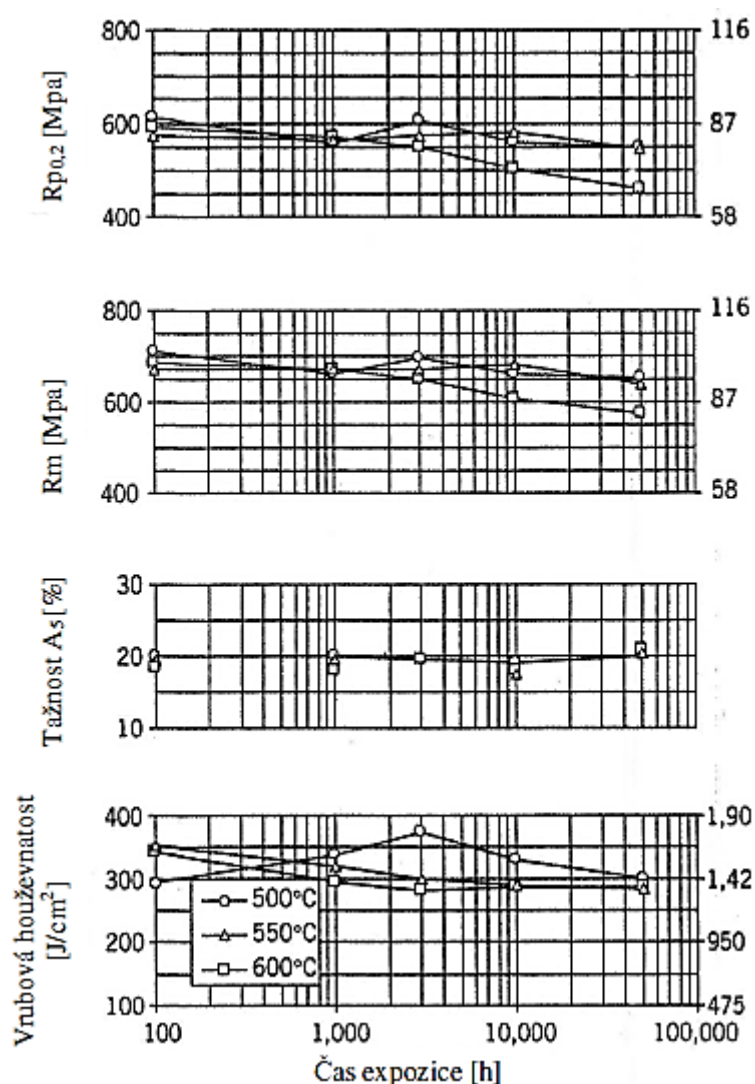
Tabulka 3: Mechanické hodnoty vybraných typů ocelí [1]

Mez pevnosti u v kluzu u oceli P24 při zvýšených teplotách (viz. obrázek. 4) je 450 MPa. Tato hodnota umožňuje použití oceli P24 nejen v oblasti creepu, ale i při zvýšených teplotách a rychlostech deformace [4].



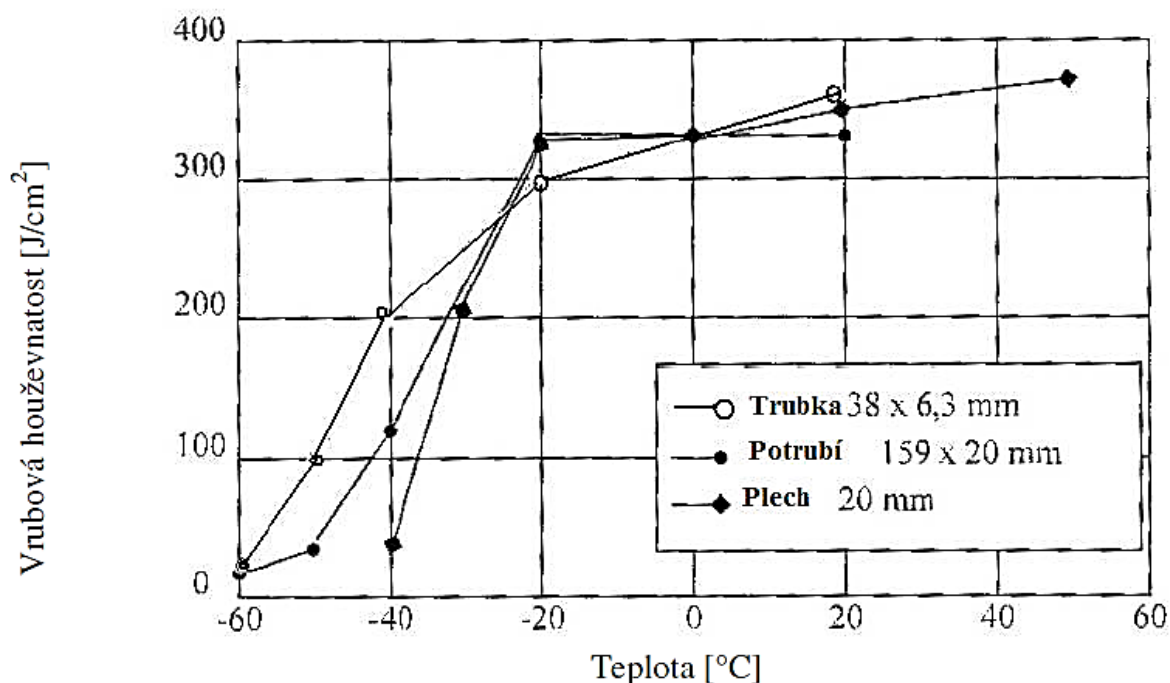
Obrázek 4: Minimální hodnoty meze kluzu v tahu v závislosti na teplotě [6]

Na obrázku 5 jsou uvedeny průběhy mechanických vlastností oceli P24 po provedení dlouhodobé expozice při teplotě 500 °C. Z těchto grafů je patrné, že mez pevnosti a mez kluzu klesají velmi pozvolna v závislosti na čase. Tažnost u této oceli je, dalo by se říci, téměř konstantní. V tomto případě byl materiál podroben kompletnímu tepelnému zpracování, bylo zde použité také popouštění [6].



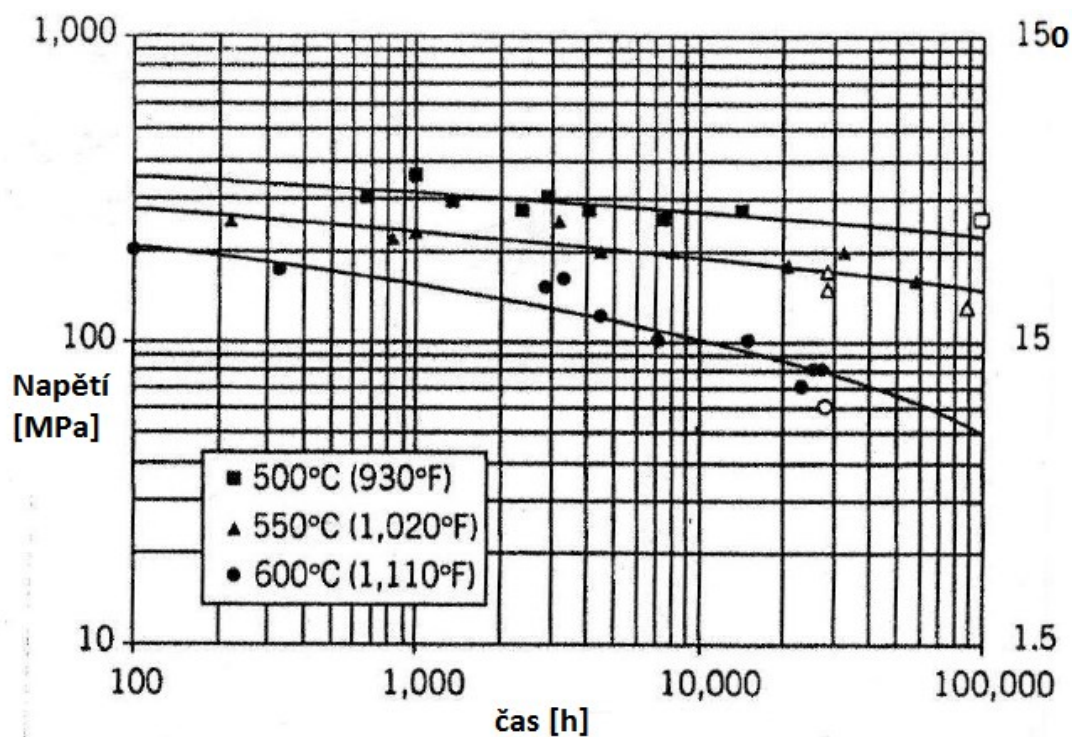
Obrázek 5 Mechanické parametry oceli P24 při expozici 550 °C [6]

Vrubová houževnatost je důležitým ukazatelem odolnosti proti porušení energetických zařízení při přechodných režimech. Rázová houževnatost oceli P24 je v rozmezí teplot od -60 °C do + 60 °C dostatečně vysoká. Na obrázku 6 je znázorněn průběh vrubové houževnatosti v rozmezí výše uvedených teplot. Z tohoto obrázku můžeme určit tranzitní oceli P24. Tranzitní teplota oceli P24 je -30 °C [6].

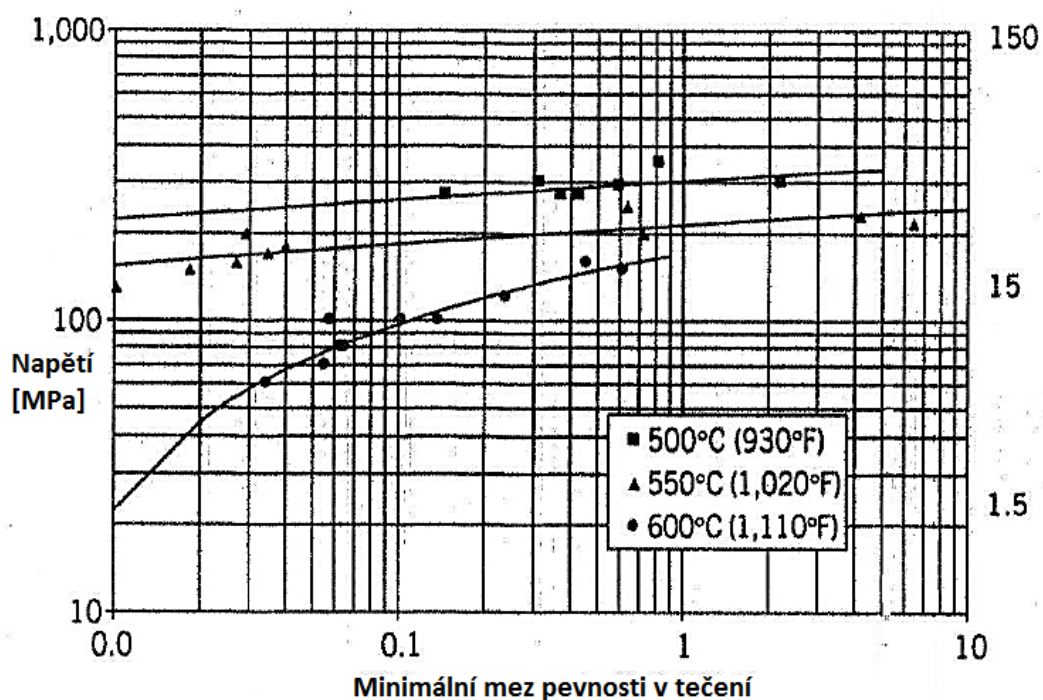


Obrázek 6 Vrubová houževnatost oceli P24 [4]

Za nejvíce směrodatný charakteristický parametr žárupevné oceli je její mez pevnosti při tečení. U oceli P24 je tento parametr vyšší než u oceli P23. Zkoušky žárupevnosti probíhají za zvýšených teplot s konstantním napětím. Zkoušky žárupevnosti pro ocel P24 probíhají při teplotách 500 °C, 550 °C a 600 °C. V práci jsou uvedeny výsledky zkoušek pro ocel P24. Na obrázku 7 můžeme pozorovat výsledky provedených zkoušek. Minimální hodnoty meze pevnosti při tečení jsou na obrázku 8 [4].



Obrázek 7 Mez pevnosti při tečení oceli P24 [6]



Obrázek 8 Parametry meze pevnosti při tečení v závislosti na teplotě vybraných žáropevných ocelí [6]

2. 2. Mechanické vlastnosti oceli P24

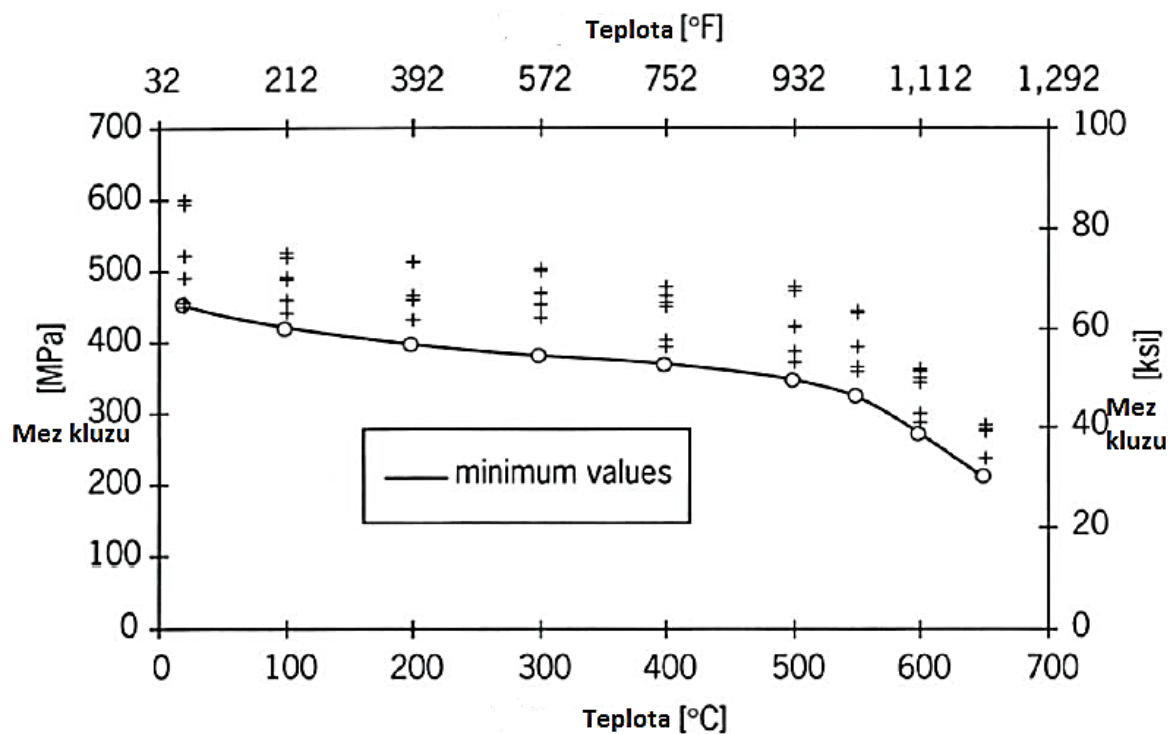
Mechanické vlastnosti za pokojových teplot oceli P24 v porovnání s dalšími ocelmi jsou uvedeny v další tabulce (tabulka 4) [3].

Standart	Oceli	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Tvrдост [-]
ASTM A 213	T22	205 (30)	415 (60)	30	163
ASTM A 213 Code Case 2199	T23	400 (58)	510 (74)	20	220
ASTM A 213 (Draft)	T24	450 (65)	585 (85)	20	250
ASTM A 213	T91	415 (60)	585 (85)	20	250
ASTM A 213	TP304 H	205 (30)	515 (75)	35	192

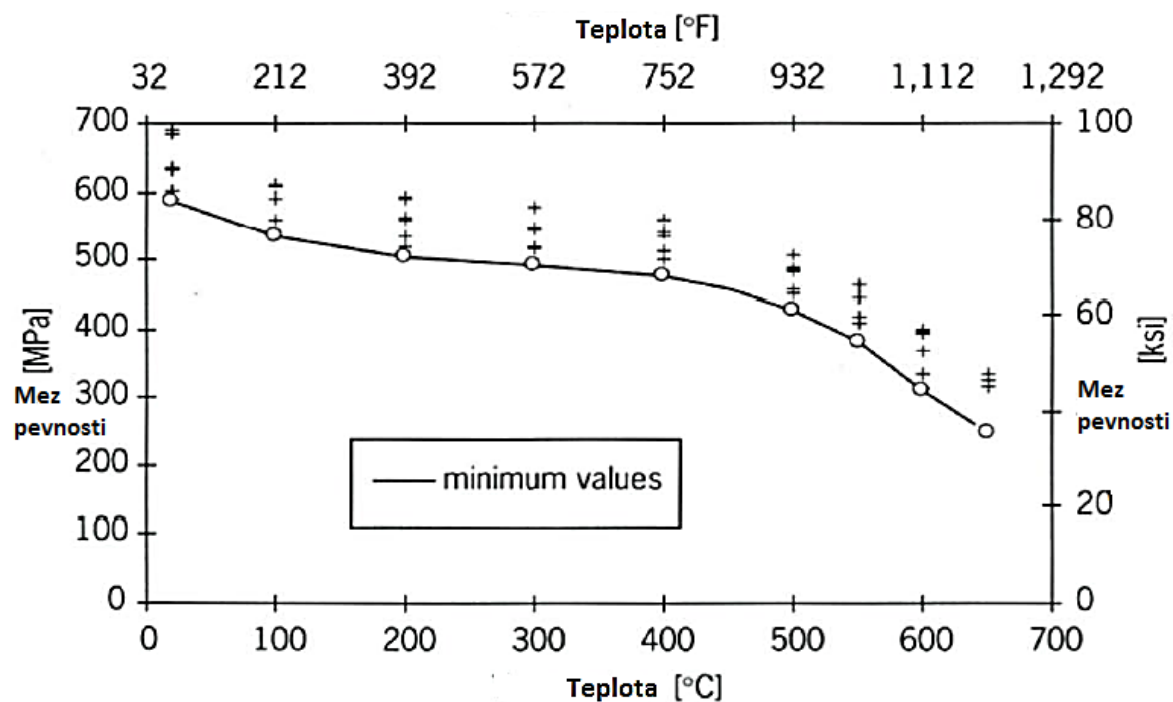
Tabulka 4: Mechanické vlastnosti oceli T24 (P24) a dalších ocelí za pokojových teplot [3]

2. 2. 1. Mechanické vlastnosti oceli P24 při zvýšených teplotách

Materiálové vlastnosti umožňují použité oceli P24 (7CrMoVTiB10 - 10) nejen creepové, ale i zaručené mezi kluzu při zvýšených teplotách tj. při pracovních teplotách do cca 350 °C. Závislost meze kluzu a pevnosti za zvýšených teplot jsou na obrázku 9 a obrázku 10. Z obrázku je zřejmé, že pokles hodnot R_e v oblasti vyšších teplot je pro ocel P24 nepatrná i při teplotě 350 °C dosahuje mez kluzu poměrně vysokých hodnot 350 - 370 MPa. Vlastnosti vyjádřené výsledky zkoušek vrubové houževnatosti základního materiálu jsou důležitým ukazatelem odolnosti vůči porušení energetických zařízení během přechodných režimů. Vrubová houževnatost oceli P24 v teplotním intervalu 20 °C až ± 20 °C splňuje požadavky normy EN 10028 – 2. Přechodová teplota podle kritéria $KV = 27$ J je poměrně nízká (45 až 30 °C) [5].



Obrázek 9: Mez kluzu oceli T24 za zvýšených teplot [6]



Obrázek 10: Pevnost v tahu u oceli P24 za zvýšených teplot [6]

2. 3. Mikrostruktura oceli P24

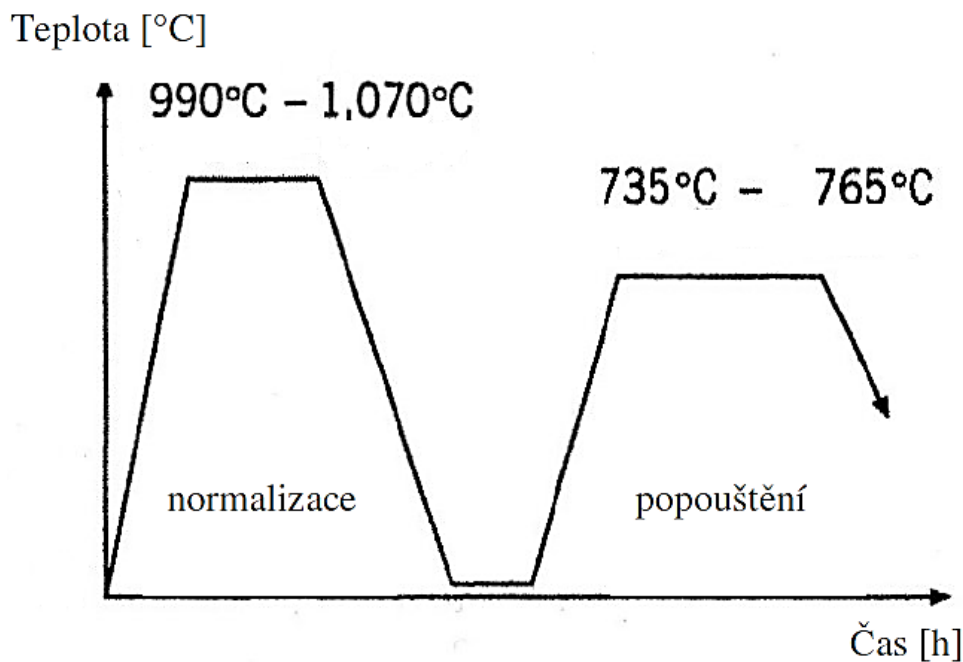
Pro určení výsledné mikrostruktury slouží ARA diagramy (diagramy anizotermického rozpadu austenitu). Tento diagram byl pro ocel P24 uveden v úvodu, u tohoto bodu bude následovat popis ARA diagramu pro ocel P24.

Pomocí ARA diagramů můžeme odečíst důležité údaje týkajícího se dalšího tepelného zpracování za zvýšených teplot. Jedná se především o teploty Ac_1 a Ac_3 . Pro ocel P24 je teplota $Ac_1 = 815\text{ °C}$ a teplota $Ac_3 = 960\text{ °C}$. Základní struktura oceli P24, po základním tepelném zpracování, která se skládá z normalizačního žíhání a popouštění, tvoří bainit. Další prvky tvořící strukturu jsou karbidy, nitridy a karbonitridy. Tyto prvky můžeme nazvat jako částice MX. V tabulce 5 jsou uvedeny hlavní prvky, které jsou přítomné v jednotlivých typech karbidů [4].

Typ karbidů (karbonitrid)	Prvky M		Prvky v X
	<i>dominantní</i>	<i>minoritní</i>	
M_3C	Fe	Cr, Mo, V, Mn	-
M_7C_3	Cr, Fe	Mo, V	-
$M_{23}C_6$	Cr, Fe	Mo, V	-
M_2X	Mo, W, Cr	V	C, N
M_6C	Mo, W, Fe	Cr, V	-
MX	V, Ti, Nb, Zr	Mo, Cr	C, N

Tabulka 5: Hlavní prvky přítomné v karbidech [4]

Průběh základního tepelného zpracování oceli P24 je na obrázku 11. Jedná se o doporučený průběh dle firmy Vallourec&Mannesmann tubes. Teplota normalizačního žíhání nebo také teplota austenizace, je $1\,000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$. Teplota popouštění je $750\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ [6].



Obrázek 11: Průběh základního tepelného zpracování oceli P24 [6]

Na dalším obrázku (obrázek 12 a obrázek 13 ve zvětšení) je znázorněna typická mikrostruktura pro ocel P24. Tato struktura vznikne po aplikaci normalizačního žíhání a popouštění a následné chladnutí na vzduchu.



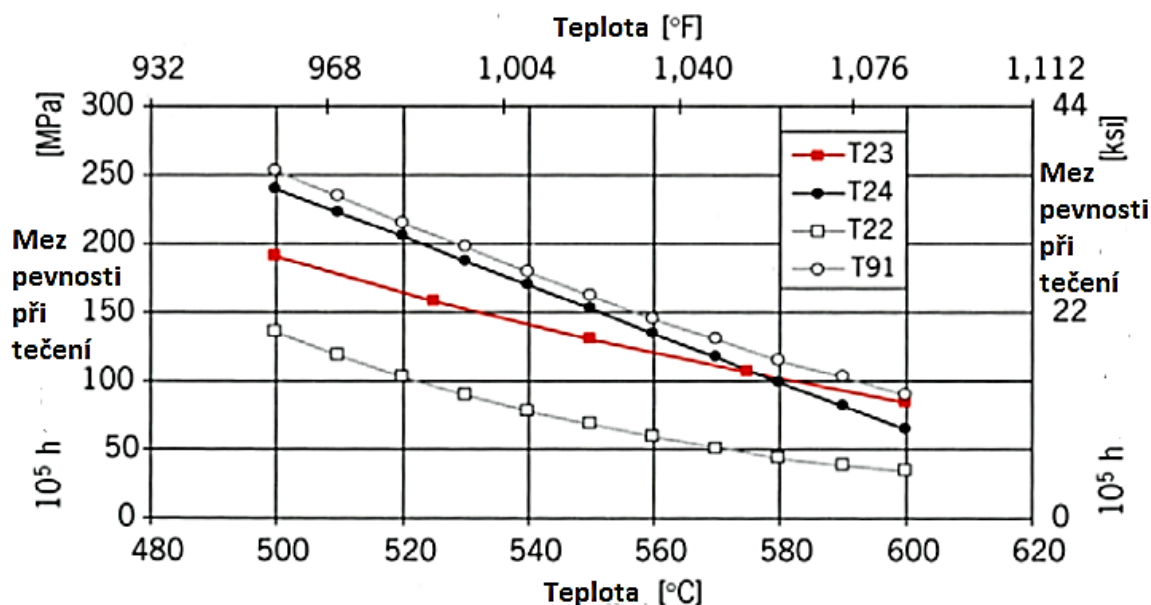
Obrázek 11: Mikrostruktura oceli P24 v měřítku 20μm [6]



Obrázek 12: Mikrostruktura oceli P24 ve zmenšeném měřítku $8\mu m$ [6]

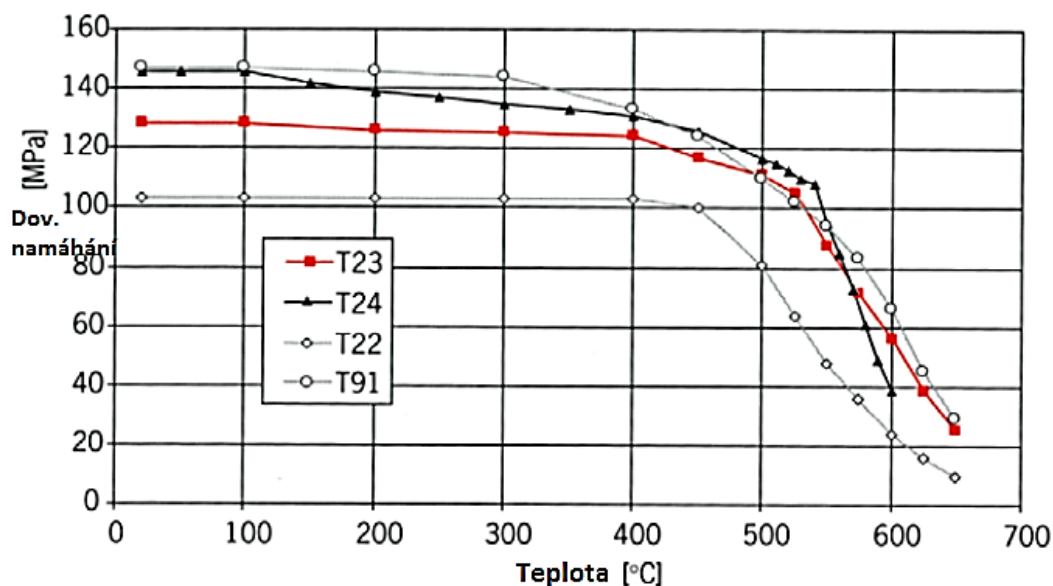
2. 4. Creepové vlastnosti oceli P24

Creepové zkoušky byly provedeny pro vzorky z oceli P24 při teplotách 500, 550, 600 °C v časech až 100 000 hodin. Byly zjištěny pouze minimální hodnoty tečení, stejně jako u konkurenční oceli P23. Obrázek 12 znázorňuje porovnání creepové pevnosti oceli P23 a P24 v porovnání s jinými běžně používanými oceli (T22 a P91) [6].



Obrázek 13: Creepová pevnost oceli P24 v porovnání s ostatními používanými oceli [6]

Další obrázek 14 porovnává dovolené namáhání u oceli P23 dle ASME 2199 a oceli P24 s ostatními běžnými oceli.



Obrázek 14: Dovolené namáhání oceli P24 v porovnání s ostatními používanými oceli [6]

2. 5. Charakteristika karbidů, které obsahuje ocel P24

V tabulce 5 bylo uvedeno, které karbidy obsahuje ocel P24. Jedná se o tyto karbidy $M_{23}C_6$, M_7C_3 , M_6C , částice MX a M_2C .

Karbid $M_{23}C_6$: je nejdůležitější karbidická fáze v modifikovaných CrMo ocelích. Karbid $(Fe, Cr)_{23}C_6$ má kubickou mřížku parametrem $a = 1,0638$ nm. Tyto částice nukleují převážně na hranicích původních austenitických zrn a také podél zrn austenitických latěk. Kromě chromu se v $M_{23}C_6$ rozpouští i relativně významné množství molybdenu a wolframu. Částice $M_{23}C_6$ obsahují i malé množství vanadu a niobu. Karbidické fáze precipitinů převážně na hranicích původních austenitických zrn a stejně tak podél hranic martenzitických latěk [7].

Karbid M_7C_3 : jedná se o sloučeninu velmi bohatou na chrom. Může být více než u karbidu $M_{23}C_6$. V CrMo ocelích je poměrně stabilní. Velmi dobře se v něm rozpouštějí železo a mangan. Rozpustnost molybdenu a wolframu je zde velmi malá [7].

Karbid M_6C : jde o další minoritní fázi. Vyskytuje se spíše ve formě M_6X . U této fáze může být na místě X uhlík, dusík či oba prvky. V mikrostruktuře tvoří hrubé částice, tím degraduje creepové vlastnosti oceli. Tvorbu této fáze ulehčují vyšší obsahy molybdenu a wolframu [7].

Částice M_2C : tyto částice se identifikovali v CrMo modifikovaných ocelích, jsou bohaté na molybden, proto by se měly spíše označovat M_2X . Částice M_2X převážně precipitují v martenzitických látkách nebo bainitických blocích. Nejčastěji se vyskytují jako jehličky. Stabilita těchto částic při tečení silně závisí na chemickém složení a na teplotě expozice. Při teplotě expozice kolem 600 °C jsou tyto částice nestabilní. To je způsobeno vylučováním sekundární fáze MX [7].

Částice MX: precipitace jemných částic MX sekundárních fází je spojována s vysokou odolností při tečení u nových bainitických ocelí. Jedná se prakticky o nitridy, karbonitridy, a proto objemový rozdíl těchto částic závisí na obsahu dusíku. Hnací silou pro precipitaci částic MX, při vysokoteplotní expozici, je buď přesycený tuhý roztok, nebo je přítomnost termodynamicky méně stabilních fází bohatých na dusík. Částice fáze MX jsou v průběhu žhánání či tečení rozměrově velice stabilní [7].

3. Svařitelnost oceli P24

Svařitelnost je jednou z důležitých technologických vlastností některých kovových materiálů a je to schopnost vytvořit kvalitní svarový spoj. Obvykle je chápána jako metalurgická, tzn. závislá především na způsobu výroby, chemickém složení, struktuře a z toho vyplývajících pnutí ve svařovaném materiálu, dále jako technologická, závislá na možné technologii svařování a použitých parametrech, a nakonec jako konstrukční, závislá na tvarovém a rozměrovém řešení spoje a jeho tuhosti [15].

Z uvedených hledisek lze kovové materiály rozdělit na svařitelné, svařitelné za určitých podmínek a běžně nesvařitelné [15].

3. 1. Svarové spoje z oceli P24

Filozofie vývoje ocelí P24 sleduje dva základní směry. V první řadě se jedná o zvýšení žárupevnosti oproti konvekčním oceli T22 (2,25%Cr1%Mo) a to vhodným dolegováním karbidotvornými a nitridotvornými prvky jako jsou vanad nebo titan. Dalším cílem je zlepšení svařitelnosti snížením množství uhlíku pod hranici 0,1 %, čím by se docílilo nižšího uhlíkového ekvivalentu. U ocelí typu P24 budou vznikat stejně jako u oceli 15 128 disperzní částice [8].

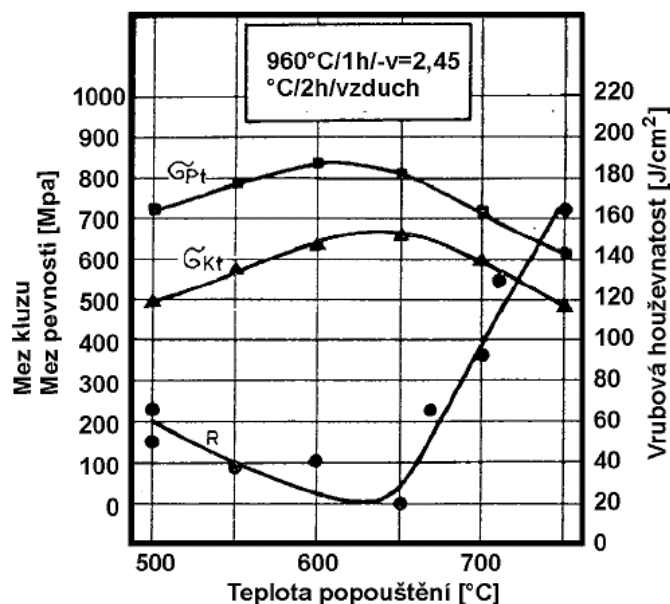
Svarové spoje se u nízkolegovaných žárupevných ocelí po svařování obvykle popouštějí. Účelem popouštění je nejen snížení zbytkových napětí, ale také stabilizovat svařované součásti a zlepšit strukturu svarového spoje, nepříznivě ovlivněnou působením teplotního cyklu svařování [8].

V průběhu rozpouštění se rozpadá martenzit resp. bainit svarového kovu na feriticko - karbidickou směs s výrazně nižší tvrdostí ve svarovém kovu a v tepelně ovlivněné zóně svarového spoje (TOZ) se objevuje četnost a disperse vytvrzujících sekundárních fází. Dosahuje se optimálního poměru mezi pevnostními a plastickými vlastnostmi svarového spoje [8].

Při absenci tepelného zpracování po svaření se u Cr-Mo-V ocelí zvyšuje riziko sekundárního zpevnění dodatečnou precipitací jemných karbidů zejména typu MX. Kromě toho se v nepropuštěném stavu zvyšuje náchylnost oceli na vznik korozního praskání pod napětím, jehož význam v daném korozním prostředí stoupá s rostoucí pevností materiálu. Na rozvoj korozního praskání se může podílet také vodík, jehož vliv vzrůstá rovněž s rostoucí pevností materiálu. Oblast výskytu korozního praskání je omezená na relativně nízké teploty (okolo 270 °C). Určitou nevýhodou aplikace tepelného zpracování je snížení žárupevnosti oproti nepropuštěnému stavu, hlavně v tepelně ovlivněné zóně (TOZ) dojde k nahnubnutí a rozpouštění precipátů a dále pak k nebezpečí vzniku žíhacích trhlin ve svarovém spoji již během popouštění [8].

Teplota popouštění se volí dostatečně vysoká, aby zpevňující sekundární fáze vznikaly v průběhu popouštění a nedocházelo k prepitaci při pracovních teplotách během provozu. S rostoucím popouštěním a množstvím velikostí částic sekundární fáze dochází nejprve k růstu pevnosti a současně k poklesu plastických a křehkolomných charakteristik, nad určitou teplotou pevnost klesá, ale zvyšují se plastické vlastnosti [8].

Na obrázku 15 je znázorněn průběh změn mechanických a dalších křehkolomných charakteristik oceli 15 128 v závislosti na teplotě popouštění v porovnání z ocelí P24. U této oceli je nutné překročit během popouštění oblast maximálního zpevnění a dosáhnout takového stavu, kdy jakákoliv další expozice na zvýšené teplotě vede k poklesu pevnosti a zvýšení plasticity [8].



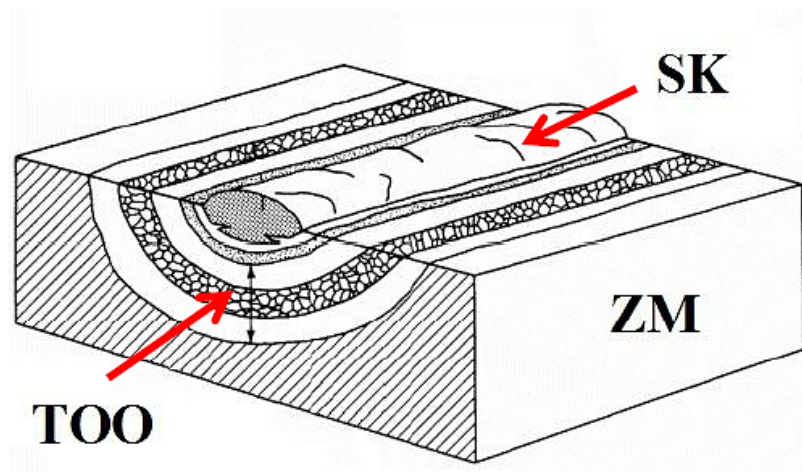
Obrázek 15: Vliv teploty popouštění na mechanické vlastnosti Cr - Mo - V oceli [8]

Příčinou změn mechanických vlastností je precipitace značného množství karpatských a karbonitridických částic sekundární fáze. Tohoto jevu se využívá pro zvýšení žárupevných vlastností. Vytvrzovací efekt ovšem přináší problém týkající se vhodné teploty popouštění. Velikost teploty popouštění je ovlivněna na jedné straně hodnotou vrubové houževnatosti a straně druhé jde o teplotu, která ovlivňuje žárupevné vlastnosti. U oceli P24 by se měla teplota popouštění pohybovat v rozmezí 750 - 760 °C [8].

4. Struktura svarového spoje

Podle obrázku 16 můžeme svarový spoj rozdělit na tři hlavní části

- základní materiál (ZM)
- svarový kov (SK)
- tepelně ovlivněná oblast (TOO) [9]



Obrázek 16: Struktura svarového spoje [9]

Tepelně ovlivněná oblast

Tepelně ovlivněnou oblast můžeme definovat jako oblast základního materiálu, jehož vlastnosti a mikrostruktura byla silně ovlivněna procesem a technikou svařování. Teplo vnesené do materiálu při jeho tavení a následném ochlazování vede ke změnám materiálu v oblasti, která přiléhá ke svaru [9].

Velikost tepelně ovlivněné oblasti závisí na tepelné vodivosti základního materiálu. Pokud je tepelná vodivost velká, ochlazovací rychlost materiálu je též velká a tepelně ovlivněná oblast bude malá.

TOO se skládá z oblastí, které jsou charakteristické specifickými změnami v jejich mikrostruktuře a jsou znázorněné na obr 17. Mezi ně patří oblast částečného natavení, hrubozrnná oblast, oblast normalizace, interkritická oblast a vyžíhaná oblast [9].

Oblast částečného natavení

Tato oblast hraničí s oblastí svarového kovu, který má maximální teplotu T_{\max} . Objevuje - li se zde tavenina společně s austenitem, takže dochází k tavení základního materiálu a k jeho promíchávání se svarovým kovem [9].

Hrubozrnná oblast

Sousedí s pásmem částečného natavení a nazývá se taky přehřátá oblast, protože v ní vzniká nežádoucí δ - ferit. Tato oblast se vyznačuje výrazně hrubým austenitickým zrnem. Při ochlazování vzniká v ocelích s nízkým obsahem chromu bainiticko - martenzitická struktura. Hrubozrnná oblast se vyznačuje nejvyšší tvrdostí a nízkými hodnotami houževnatosti, která je závislá na chemickém složení oceli a na rychlosti ochlazování po ukončení svařování [9].

Oblast normalizace

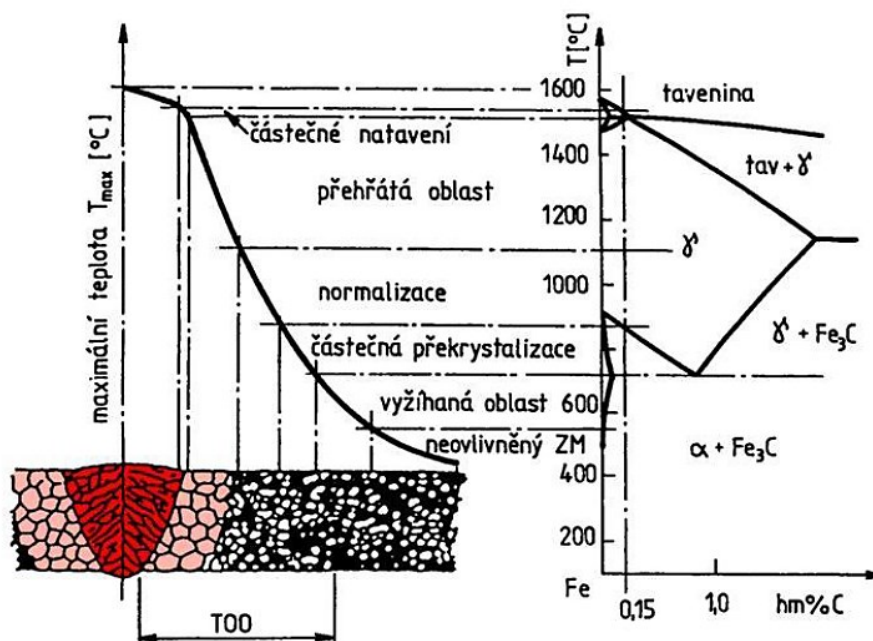
V rozmezí teplot 900 - 1100 °C je struktura tvořena austenitem a malým podílem precipitátů, které brání růstu austenitického zrna. Z tohoto důvodu vzniká během chladnutí výsledná jemnozrnná struktura. Z hlediska dlouhodobé creepové expozice se tato oblast svarového spoje jeví jako nejkritičtější [9].

Interkritická oblast

Nachází se mezi teplotami Ac_1 a Ac_3 , kde dochází během ohřevu k částečné transformaci feritu na austenit. Netransformovaný bainit je během svařování vyžíhán. Část precipitátů se rozpustí a po aplikaci PWHT může dojít k zhrubnutí nerozpuštěných částic. Struktura vzniklá po ochlazení se vyznačuje přítomností nově vzniklého bainitu a vyžíhané nebo rekrystalizované původní mikrostruktury. Tato oblast svarového spoje je charakteristická malou velikostí zrna a vykazuje nejnižší hodnoty tvrdosti [9].

Vyžíhaná oblast

Při teplotách blízko pod Ac_1 mikrostruktura sice neprodělává fázovou transformaci, ale dochází zde k lokálnímu přehřátí oproti chladnějšimu základnímu materiálu. To se projevuje zhrubnutím precipitátů v důsledku vyššího koeficientu difúze při dané teplotě [9].



Obrázek 17: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [9]

Svarový kov

Vzniká natavením základního a přídavného materiálu. Procentuální množství roztaveného základního materiálu ve svarovém kovu označujeme jako promísení, a jeho velikost se liší podle použité svařovací technologie. Při ochlazování krystalizuje svarový kov hlavně v důsledku heterogenní nukleace na svarových plochách. Mikrostruktura svarového kovu závisí především na jeho chemickém složení a na parametrech svařování [9].

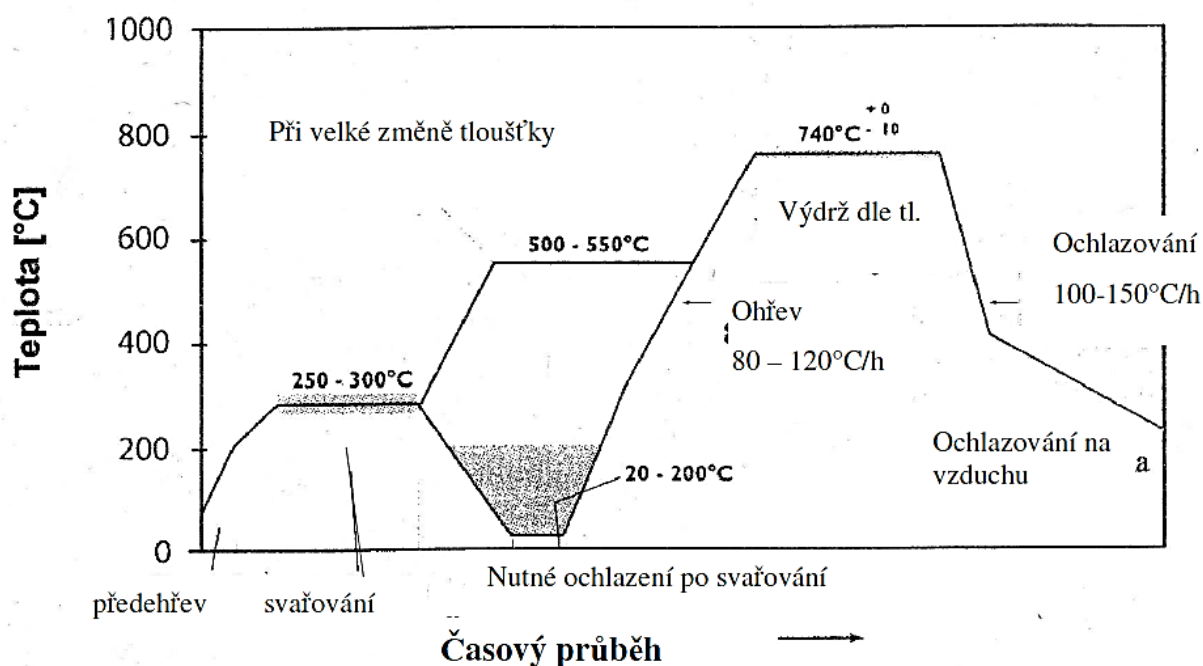
5. Teplotní režim svařování

Při svařování žárupevné nízkolegované oceli P24 se snažíme použít pokud možno nejnížší teplotu předehřevu. Na druhou stranu musí být tato teplota dostatečně vysoká, aby bránila vzniku trhlin ve svarovém spoji.

Na určení teploty předehřevu mají vliv následující činitele:

- chemické složení základního a přídavného materiálu
- obsah vodíku ve svarovém spoji
- tloušťka svarového spoje, tuhost konstrukčního uzlu atd.

Na obrázku 18 je znázorněn teplotní režim svařování. Jedná se o závislost teploty na čase. V tomto teplotním režimu jsou uvedeny všechny aspekty pro vytvoření ideálního svarového spoje. Tento režim obsahuje předehřev, vlastní svařování, dodržení mezihousenkové teploty a následné popouštění [9].



Obrázek 18: Teplotní režim svařování pro ocel P24 a P23 [9]

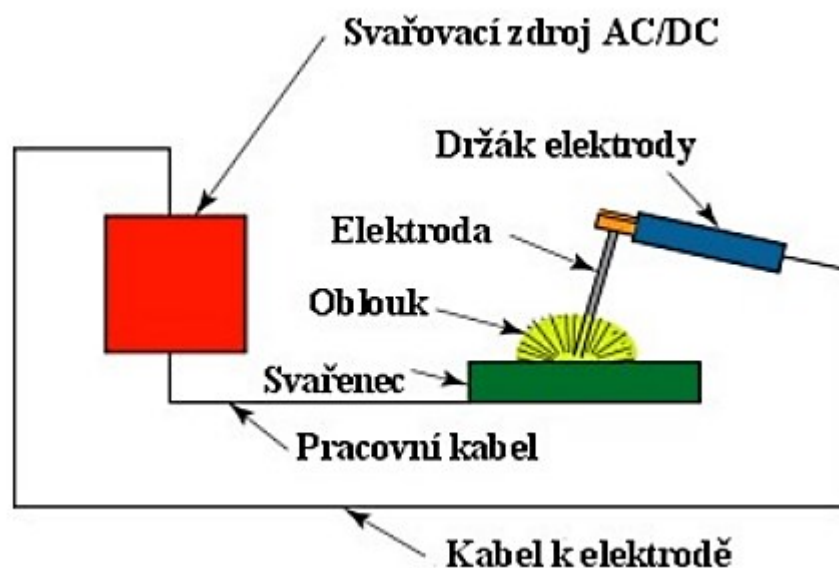
6. Způsoby svařování oceli P24 s aplikací na energetická zařízení

Pro svařování oceli P24 na energetické zařízení se používají tyto metody svařování:

- metoda 111 (ruční obloukové svařování obalenou elektrodou)
- metoda 121 (svařování pod tavidlem)
- metoda 141 (oblouková svařování netavící se (wolframovou) elektrodou v inertním plynu)

1) Princip metody svařování 111: jedná se o základní metodu svařování, její využití v dnešní době klesá, tímto způsobem se dají svařovat různé materiály.

Elektrický oblouk vzniká mezi koncem obalené kovové elektrody a svařencem, kdy roztavené kapky jsou chráněny plyny, které vznikají z rozpadu obalu, jež je tvořen tavidly. Roztavená struska se dostává na povrch svarového lázně, kdy během tuhnutí chrání svarový kov před přístupem atmosféry. Po svaření každé housenky je nutno strusku odstranit [10].

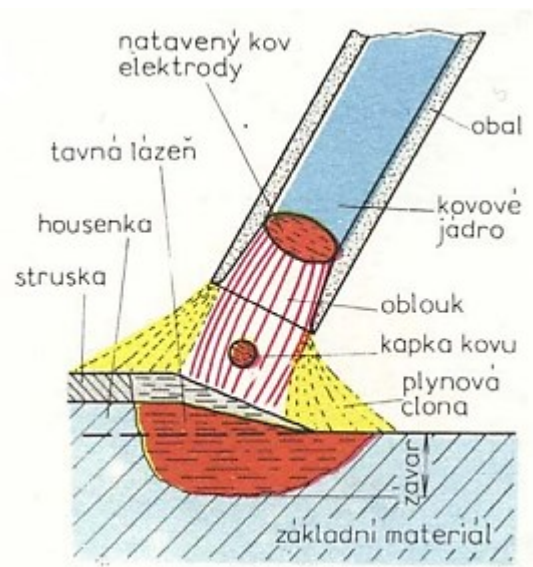


Obrázek 19: Schéma svařování metodou 111 [10]

Při svařování elektrickým obloukem s obalenou elektrodou dochází k odtavování konce elektrody a odtavený konec elektrody se zúčastňuje tvorby spoje jako přídatný materiál.

Funkce obalu elektrod:

- funkce plynotvorná (při hoření oblouku vznikají z obalu kouře a plyny, které vytvářejí druh ochranné atmosféry a brání přístupu vzdušného kyslíku a dusíku ke svarové lázni)
- funkce ionizační (slouží v obalu pro usnadnění zapalování a hoření oblouku)
- funkce metalurgická - rafinace (snížení P a S), desoxidace (snížení O_2) a legování (Cr, Mo) [10].



Obrázek 20: Přenos kovu při svařování metodou 111 [10]

Pro ruční svařování elektrickým obloukem se jako přídatné materiály používají obalené elektrody. Tyto se skládají z jádra a z obalu elektrody.

Jádro tvoří drát o průměru 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0 mm

Podle složení obalu rozdělujeme elektrody na:

- stabilizační
- rutilové označení R
- rutil - celulozové označení RC
- rutil - kyselé označení RA
- rutil- bazické označení RB
- tlustostěnné rutilové označení RR
- kyselé označení A

- bazické označení B
- celulozové označení C

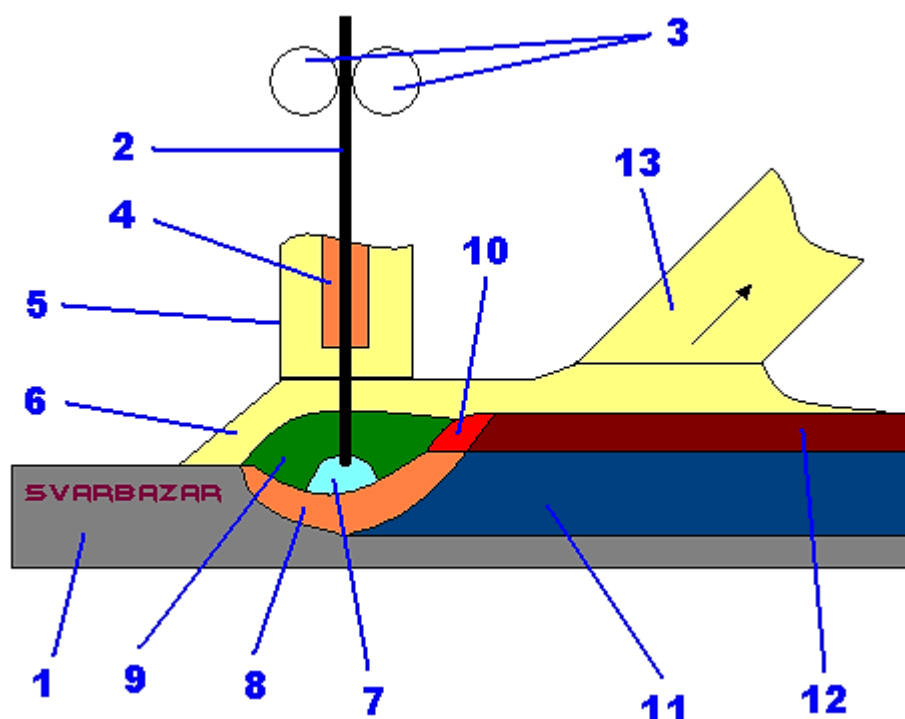
Svařovací proud může svářeč nastavit podle údajů výrobce elektrod [10]

2) Princip metody svařování 121:

Tato metoda patří mezi nejjakostnější a nejproduktivnější metody svařování kovů. Vyznačuje se minimálními emisemi škodlivin a nebezpečného UV záření.

Svařování pod tavidlem, v zahraničí je označované jako svařování SAW (Submerged Arc Welding), je ve své podstatě svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou. Elektrický oblouk hoří mezi základním svařovaným materiálem a odtavující se elektrodou. Elektroda je ve formě drátu navinutého na cívce a za pomoci elektromotorem poháněných kladek je posouvána do hořícího oblouku.

Zásadní rozdíl oproti metodě svařování MIG/MAG je ale v ochraně svarové lázně před oxidací, tedy před přístupem vzduchu. Zatímco u metody MIG/MAG je ochrana zajištěna ochranným plynem, u svařování pod tavidlem zajišťuje ochranu práškové tavidlo. Svarová lázeň je během svařování neustále zasypávána vrstvou tavidla a pod touto vrstvou dokonce hoří i elektrický oblouk. Oblouk není vůbec viditelný, je schován pod vrstvou tavidla a z toho pramení minimální emise škodlivých dýmů a záření. Část práškového tavidla se působením vysoké teploty taví a následně tuhne a vytváří ochranný struskový kryt nad tavnou lázní a tuhnoucím svarovým kovem. Zároveň na sebe váže vyplavené nečistoty, může dolegovávat svarový kov. Z roztaveného tavidla se také uvolňují plyny, které vytvářejí ochrannou atmosféru. Oblouk nehoří přímo v tavidle, ale v dutině naplněné plynem, který se z tavidla uvolní. Tavidlo plní podobnou funkci jako obal klasické elektrody. Zbývá, neroztavená, část tavidla se odsává pro další použití. Celý princip objasňuje následující obrázek 21 [11].



Obrázek 21: Princip svařování pod tavidlem [11]

Vysvětlivky k obrázku 19: 1. základní (svařovací) materiál; 2. drátová elektroda (svařovací drát); 3. podávací kladky poháněné motorem; 4. napájecí kontaktní průvlak; 5. hubice přivádějící práškové tavidlo k místu svařování; 6. práškové tavidlo; 7. elektrický oblouk; 8. tavná svarová lázeň; 9. dutina naplněná plynem, který se uvolnil z tavidla; 10. roztavená struska; 11. ztuhlý svarový kov (svarová housenka); 12. ztuhlá struska; 13. odsávání přebytečného tavidla



Obrázek 22: Ukázka svařování pod tavidlem [11]

Zařízení pro svařování pod tavidlem:

Svařování pod tavidlem se provádí zcela automatizovaně tzv. automatickým svařování pod tavidlem (APT). Celá automatizace spočívá v tom, že hořák je umístěn na motoricky poháněném vozíku (svařovací traktor) a dále je zajištěna stabilizace oblouku.

Svařovací traktor, kromě vlastního hořáku, nese cívku s drátem a podavač. Dále se na něm nachází násypka na tavidlo a řídicí panel pro nastavování parametrů. Traktor je kabelem spojen se stacionárním zdrojem svařovacího proudu - svářečkou. Traktor může pojíždět po kolejnicích nebo přímo po materiálu a správný směr udržuje svářeč jeho směrovým vedením.

Kromě traktorů se používají stacionární svařovací hlavy, pod kterými se musí posouvat svařenec. Další možností je použití dráhových automatů - portálů, tedy dlouhých ramen schopných lineárního pohybu. Rameno pak nese svařovací hlavu [11].



Obrázek 23: Příklad svařovacího traktoru svařování pod tavidlem [11]

Přídavné svařovací materiály a tavidla:

Jako přídavný materiál se používá drát podobného složení, jako pro metodu svařování MIG/MAG. Nejběžnější jsou průměry elektrod 3,2 a 4 mm. Kromě plných drátů se používají i dráty trubičkové. Pro navařování velkých ploch (např. korozivzdorným návarem) se místo drátu používá kovová páska, nejčastěji o rozměrech 0,5 x 60 mm. Přídavné materiály se dodávají na cívkách, které mají ale podstatně větší průměr, než cívky pro metodu svařování MIG/MAG. Velké průměry drátů se dodávají jen jako svitky [11].

Tavidla se nejčastěji dodávají v pytlích a existuje jich velké množství druhů. Z hlediska technologie výroby tavidel se rozlišují na tavidla tavená a aglomerovaná. Tavená tavidla vznikají přetavením směsi surovin v elektrické peci, odlitím taveniny a následného rozemletí. Aglomerovaná tavidla se vyrábějí granulací namíchané suché směsi surovin přidáním pojiva [11].



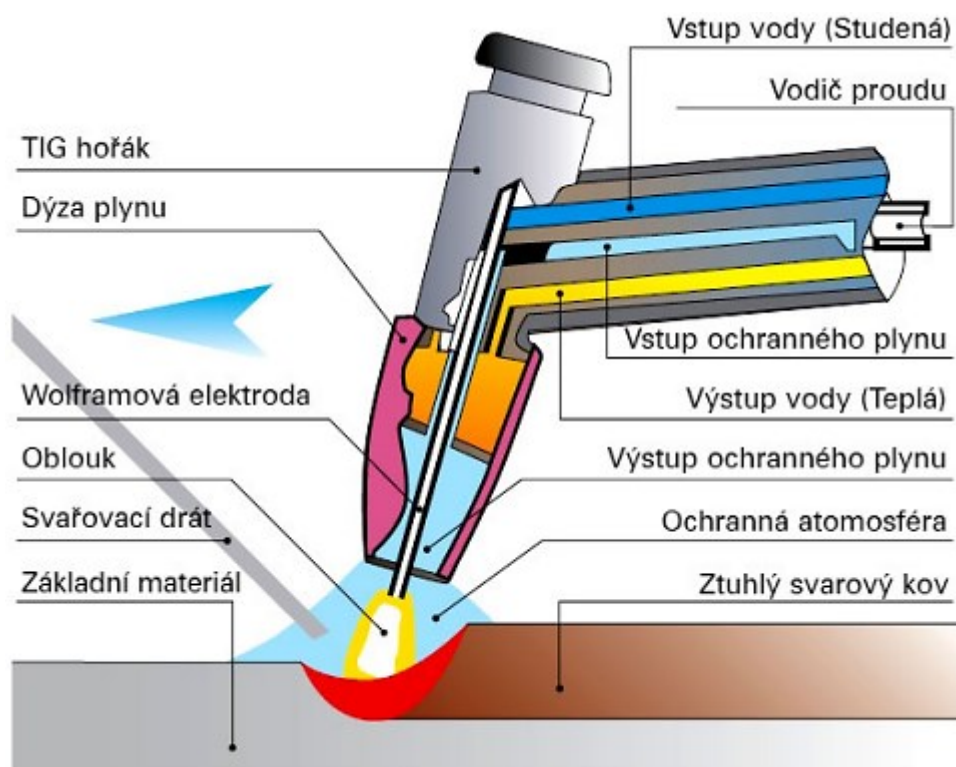
Obrázek 24: Příklad svařovacího traktoru svařování [11]

3) Princip metody svařování 141

Při svařování metodou 141 hoří oblouk mezi netavicí se elektrodou a základním materiálem. Ochranu elektrody i tavné lázně před okolní atmosférou zajišťuje netečný plyn argon, hélium a jeho směsi. Svařování lze realizovat s přídavným materiálem ve formě drátu ručním způsobem, nebo automatické svařování s podavačem drátu s proměnnou rychlostí svařování.

Pro svařování uhlíkové oceli se metoda 141 používá méně z důvodu nebezpečí vzniku póru ve svaru z ekonomického hlediska. Svařování wolframovou elektrodou se používá pro spojování obtížně svařitelných materiálů s vysokou afinitou ke kyslíku např. titan, zirkon.

Lze svařovat různorodé materiály - ocel s mědí, bronzem nebo niklovými slitinami a návary v oblasti renovací např. nástrojové oceli [12]



Obrázek 25: Princip svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu metodou 141 (TIG, WIG) [12]

Svařování metodou 141 se využívá v těchto oblastech:

- svařované konstrukce z vysokolegovaných ocelí pro chemický, potravinářský průmysl
- žárupevné a žáruvzdorné oceli pro výrobu kotlů, tepelných výměníků a pecí
- titanové a speciální slitiny v oblasti výroby letadel a kosmické techniky
- svařování hliníkových slitin v oblasti dopravní techniky [12]

Ochranné plyny: hlavní úlohou je zamezit přístupu vzduchu do oblasti svařování tj. především chránit elektrodu, oblouk i tavnou lázeň, její okolí a kořen svaru před účinky vzdušného kyslíku, který způsobuje oxidaci, pórovitost a propal prvků.

Ochranné plyny mají také významný vliv na: typ přenosu kovu v oblouku, přenos tepelné energie do místa svaru, chování tavné lázně, hloubku závaru a rychlost svařování a další parametry svařování [12].

Ochranné plyny svým složením a množstvím ovlivňují tyto charakteristiky svařování:

- vytvoření ionizovaného prostředí pro dobrý start a hoření oblouku
- síly působící v oblouku
- tvar a rozměry oblouku
- hladkost povrchu svaru a jeho přechod na základní materiál
- kvalitu, celistvost a mechanické vlastnosti svarového spoje [11]

7. Experimentální část

7. 1. Metodiky a technologické parametry

Základním materiálem byla trubka z oceli 7CrMoVTiB10 - 10 (P24 nebo T/P24) o průměru 42,8 mm a tloušťce stěny 7,1 mm (\emptyset 42,8 x 7,1)mm určená pro výrobu membránových stěn od firmy Vallourec&Mannesmann tubes (číslo materiálu je EN 1.7378). Pro svařování této trubky byla použita metoda svařování 141 TIG. V tabulce 6 jsou požadované materiálové vlastnosti na trubky z oceli P24 (7CrMoVTiB10 - 10) dle ČSN EN 10216 - 2 + A2.

	Ocel P24
	(7CrMoVTiB 10 - 10)
R_m [MPa]	565 - 840
A_{min} (podélně) [%]	17
Kv_{min} při 20 °C [J]	40
Rp0,2 pro tl. stěny t≤16 mm [MPa]	450

Tabulka 6: Požadované materiálové vlastnosti pro trubky z oceli P24 [7]

Tabulka 7 ukazuje mechanické hodnoty oceli P24

Ocel P24	
R_m [MPa]	665
Nárazová práce [J]	215
A [%]	20
Rp0,2 [MPa]	553

Tabulka 7: Mechanické hodnoty oceli P24 [7]

Tabulka 8 udává chemické složení oceli P24 a tavební složení svarového spoje

Legující prvek obsahy v [v hm. %]	standart T/P24 (7CrMoVTiB10-10)	Tavební složení svarového spoje
<i>C</i>	0,05 - 0,10	0,084
<i>Si</i>	0,15 - 0,45	0,271
<i>Mn</i>	0,30 - 0,70	0,54
<i>P</i>	max. 0,020	0,01
<i>Si</i>	max. 0,010	0,0028
<i>Ni</i>	-	-
<i>Cr</i>	2,20 - 2,60	2,463
<i>Mo</i>	0,90 - 1,10	0,962
<i>W</i>	-	-
<i>Ti</i>	0,05 - 0,10	0,064
<i>V</i>	0,20 - 0,30	0,228
<i>Nb</i>	-	-
<i>Al</i>	max. 0,020	0,014
<i>N</i>	max. 0,012	0,0095
<i>B</i>	0,0015 - 0,0070	0,0048

Tabulka 8: Standartní složení oceli P24 a tavební složení svarového spoje

Zvolení typu přídatného materiálu

Prvním zvoleným přídatným materiálem pro svařování metodou 141 byl drát **Union P24 W ZCrMo2VTi/Nb** o průměru 2,5 mm a délky 1 000 mm. Chemické složení zvoleného přídatného materiálu je uvedeno v tabulce 9.

Legující prvek obsahy v [v hm. %]	Přídatný materiál
<i>C</i>	0,05
<i>Si</i>	0,30
<i>Mn</i>	0,5
<i>Cr</i>	2,2
<i>Mo</i>	1,00
<i>V</i>	0,22
<i>Ti/Nb</i>	0,05

Tabulka 9: Chemické složení přídatného materiálu s označením Union I P24 W ZCrMo2VTi/Nb [7]

Charakteristika zvoleného přídavného materiálu:

- výrobce přídavného materiálu je firma Böhler - Thyssen
- označení přídavného materiálu je dalších norem:

Podle evropské normy (EN): 12 070 - W ZCrMo2VTi/Nb,

Podle americké normy (AWS A): 5.28 - 96: ER 90S - G

Ochranný plyn byl zvolen **argon**

Obecné vlastnosti: atmosféra obsahuje asi 0,9 % argonu. Argon je neutrální a bezbarvý plyn jako dusík, ale kromě vzduchu nemá přirozený výskyt. Je nedýchatelný, ale často se používá v průmyslu, kvůli vysoké chemické inerci a poměrně snadné produkci [16].

Chemické označení: Ar

Označení plynu: UN 1006

Označení kapaliny: UN 1951

Vlastnosti plynu:

molekulová váha: 39,948 g/mol

pevná fáze:

bod tání: $-189\text{ }^{\circ}\text{C}$

latentní teplo fúze (1.013 barů, v trojném bodu): 29,41 kJ/kg

kapalná fáze:

hustota kapaliny (1.013 barů při bodu varu): $1\,392,8\text{ kg/m}^3$

ekvivalent kapalina/plyn (1.013 barů a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($59\text{ }^{\circ}\text{F}$)): 835 vol/vol

bod varu (1.013 barů): $-185,9\text{ }^{\circ}\text{C}$

výparné teplo (1.013 barů při bodu varu): $-160,81\text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$ [16]

Druhým zvoleným přídavným materiálem pro svařování metodou 141 je **Union S P24 SZ CrMo2VNb** o průměru 4,0 mm a délky 1 000 mm
Chemické složení zvoleného přídavného materiálu je uvedeno v tabulce 10.

Legující prvek	Přídavný materiál
obsahy v [v hm. %]	
C	0,10
Si	0,20
Mn	0,60
Cr	2,20
Mo	1,00
V	0,24
Nb	0,05

Tabulka 9: Chemické složení přídavného materiálu s označením
Union S P24 SZ CrMo2VNb [13]

Charakteristika zvoleného přídavného materiálu:

- výrobce přídavného materiálu je také firma Böhler - Thyssen
- označení přídavného materiálu je dalších norem:

Podle evropské normy (EN): 12 070 - SZ CrMo2VNb

Podle americké normy (AWS A): 5.23 - EG

Ochranný plyn byl zvolen **argon**

Obecné vlastnosti: atmosféra obsahuje asi 0,9 % argonu. Argon je neutrální a bezbarvý plyn jako dusík, ale kromě vzduchu nemá přirozený výskyt. Je nedýchatelný, ale často se používá v průmyslu, kvůli vysoké chemické inerci a poměrně snadné produkci [16].

Chemické označení: Ar

Označení plynu: UN 1006

Označení kapaliny: UN 1951

Vlastnosti plynu:

molekulová váha: 39,948 g/mol

pevná fáze:

bod tání: $-189\text{ }^{\circ}\text{C}$

latentní teplo fúze (1.013 barů, v trojném bodu): 29,41 kJ/kg

kapalná fáze:

hustota kapaliny (1.013 barů při bodu varu): $1\,392,8\text{ kg/m}^3$

ekvivalent kapalina/plyn (1.013 barů a 15 °C (59 °F)): 835 vol/vol

bod varu (1.013 barů): $-185,9\text{ °C}$

výparné teplo (1.013 barů při bodu varu): $-160,81\text{ kJ/kg °C}$ [16]

Podle dvou zvolených typů přídavných materiálů pro metodu svařování 141 volím první uvedený přídavný materiál s označením **Union I P24 W ZCrMo2VTi/Nb**. Tento zvolený přídavný materiál se používá pro svařování ocelí P24 a pochází od výše zmiňované firmy Böhler - Thyssen.

7. 1. 1. Příprava svarového spoje oceli P24

Svařování trubky z oceli T24 probíhalo ve třech vrstvách s jednotlivými parametry svařování. Po svařování byl svarový spoj dochlazován v sibalu, v podstatě jde skelnou vatu. Tím se docílí pomalejšího ochlazování po svařování (tzv. termo - zábal). Po úplném vychlazení byl ze svarového spoje vyřezán zkušební vzorek. Řez byl proveden pomocí metalografické brusky bez minimálního tepelného ovlivnění a byl veden kolmo na osu svarového spoje. Vzorek byl dále za studena zalit do dentakrylu technického a následně byla provedena příprava pro metalografické šetření a to mechanické broušení a leštění na metalografických bruskách. Následně byl vzorek předán pro následné metalografická šetření.

Parametry svařování trubky z oceli P24

- použitá technologie svařování 141 TIG
- teplota přehřevu: $T_p = 200\text{ °C}$
- účinnost metody svařování 141 TIG: $\eta = 0,6$ (60 %)
- ochranný plyn II (100 % argon)

Svařování probíhalo ve 3 vrstvách s následujícími parametry:

Svařování 1. housenky:

- čas svařování: $t = 130 \text{ s}$
- DC svařovací napětí: $U = 13 \text{ V}$
- svařovací proud: $I = 120 \text{ A}$
- svařovací rychlost $v = 0,764 \text{ m/s}$
- skutečný příkon $Q = \frac{U \cdot I}{v} = \frac{13 \cdot 120}{0,764}$

$$Q = 12 \text{ KJ/cm}$$

Svařování 2. housenky:

- čas svařování: $t = 150 \text{ s}$
- DC svařovací napětí: $U = 14 \text{ V}$
- svařovací proud: $I = 140 \text{ A}$
- svařovací rychlost $v = 0,764 \text{ m/s}$
- skutečný příkon $Q = \frac{U \cdot I}{v} = \frac{14 \cdot 140}{0,764}$

$$Q = 15,4 \text{ KJ/cm}$$

Svařování 3. housenky:

- čas svařování: $t = 182 \text{ s}$
- DC svařovací napětí: $U = 14 \text{ V}$
- svařovací proud: $I = 110 \text{ A}$
- svařovací rychlost $v = 0,707 \text{ m/s}$
- skutečný příkon $Q = \frac{U \cdot I}{v} = \frac{14 \cdot 110}{0,707}$

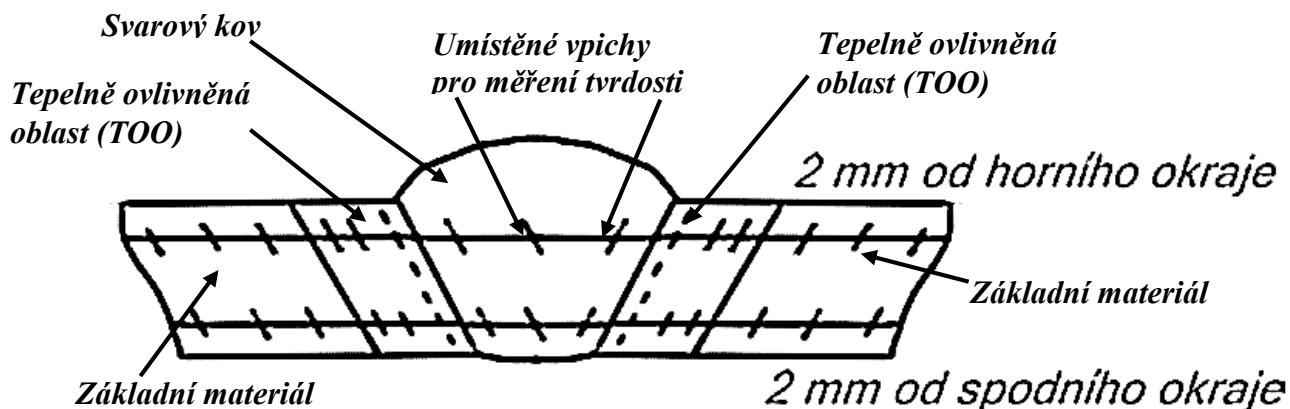
$$Q = 16,6 \text{ KJ/cm}$$

Maximální teplota interpass byla $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

7. 1. 2. Metody přípravy a realizace metalografického šetření

Metalografické mikrostrukturní šetření bylo provedeno metodou kolmého řezu pomocí světelné mikroskopie na vybavení Neophot 21 za počítačové podpory Quick Photo Industrial 2. 2. Preparace probíhala pomocí přístroje Fy Strucus. Makroskopické hodnocení bylo provedeno pomocí digitálního fotoaparátu Nikon Coolpix P7700. Dělení materiálu a samotná příprava pro metalografické šetření byla realizována pomocí přístrojů firmy Struers. Z trubky oceli P24 byl vyřezán zkušební vzorek, u kterého po tomto procesu probíhalo zalití do dentacrylu technického. Poté vytvrzení byla provedena úprava povrchu broušením a leptáním, K leptání byl použito Nitalu 4% (líh + kyselina dusičná). V případě měření tvrdosti byly jednotlivé vpichy vedeny v linii 2 mm od horního a dolního okraje, kde probíhalo pomocí tvrdoměru měření hodnot tvrdosti v jednotlivých pásmech svarového spoje. Měření probíhalo podle Vickerse.

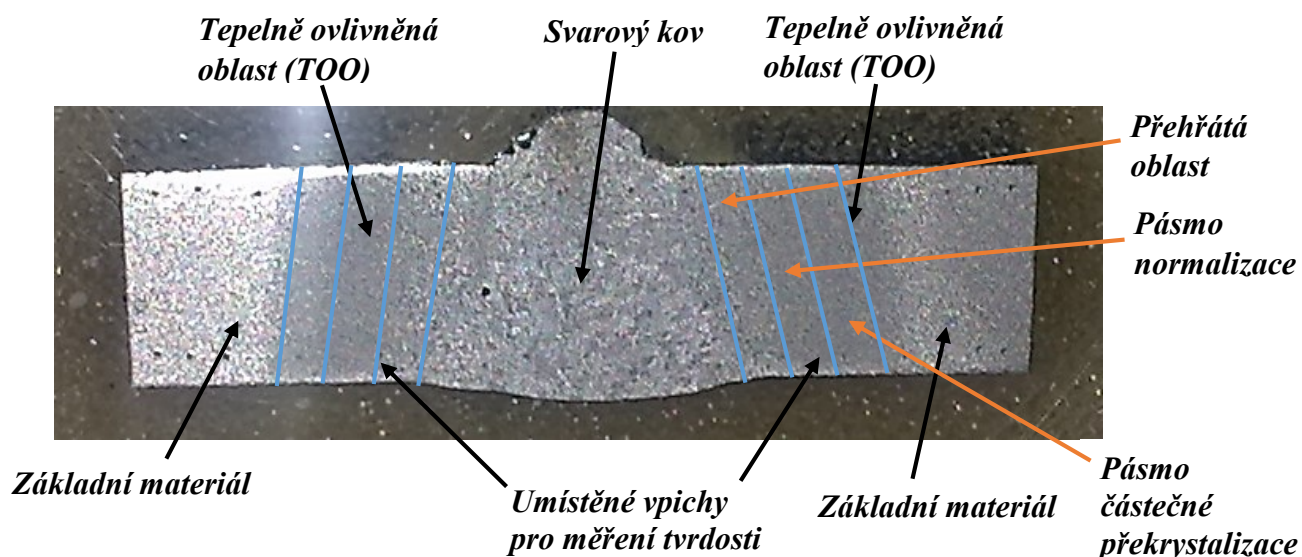
Na obrázku 26 je makroskopická dokumentace vzorku z oceli P24, který obsahuje umístěné vpichy pro měření tvrdosti a popis oblasti svarového spoje



Obrázek 26: Makroskopická struktura svarového spoje oceli P24 (schéma)

7. 2. Hodnocení a realizace experimentálních šetření

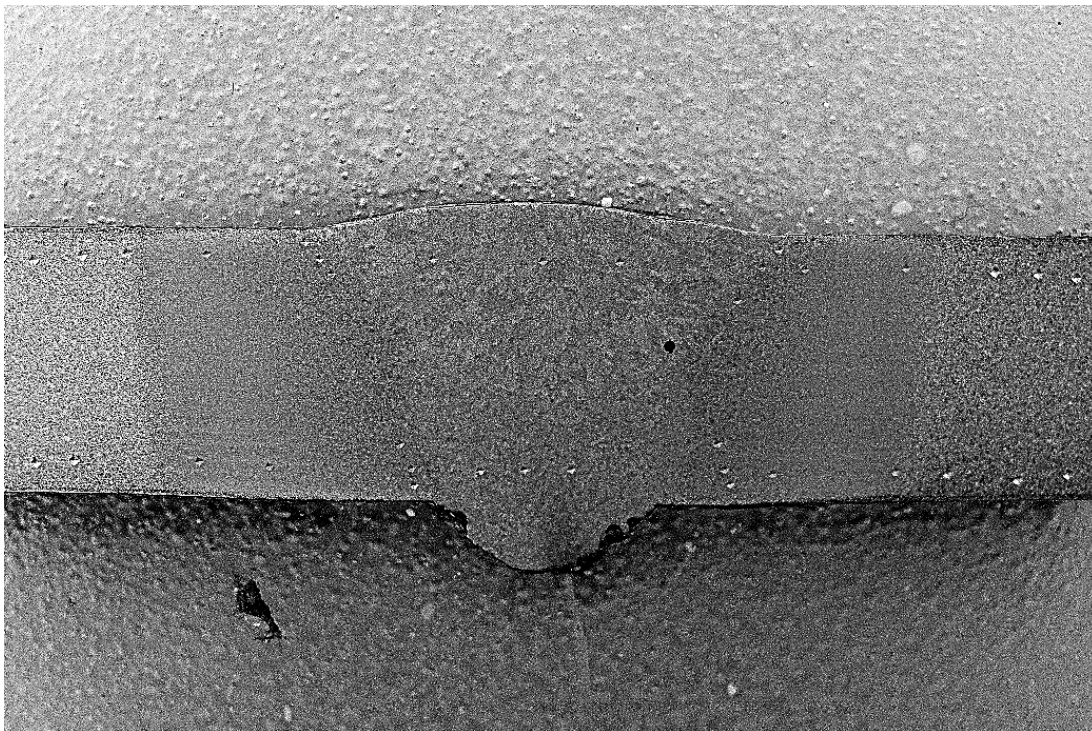
U připraveného vzorku z oceli P24 byly provedeno broušení, zalévání zastudena a leptání. K metalografickému šetření bylo použito světelné mikroskopie na vybavení Neophot 21. Makrostrukturního šetření se provádí z důvodu, aby se zjistilo, zda svarový spoj neobsahuje vady, jako jsou např. trhliny, póry a vměstky. Mikrostrukturní šetření naopak zjišťuje strukturní stav. Měření tvrdosti byly provedeny tak, že v oblasti krycí vrstvy byly umístěny vpichy 2mm od svarového spoje od horního a dolního okraje. Měření probíhalo pomocí tvrdoměru. Hodnoty byly zaznamenány v jednotlivých oblastech svarového spoje v určité vzdálenosti. Výsledkem je graf měření tvrdosti HV10, který se porovná s přípustnou hodnotou tvrdosti 350 HV10.



Obrázek 27: Makroskopická dokumentace svarového spoje oceli P24 zalitého v dentacrylu technického

7. 2. 1. Makroskopické šetření svarového spoje oceli P24

Na obrázku 28 je dokumentace makrostruktury svarového spoje oceli P24 ve zvětšeném měřítku. Vzorek je zalitý do dentacrylu technického ve kterém probíhalo vytvrzování.

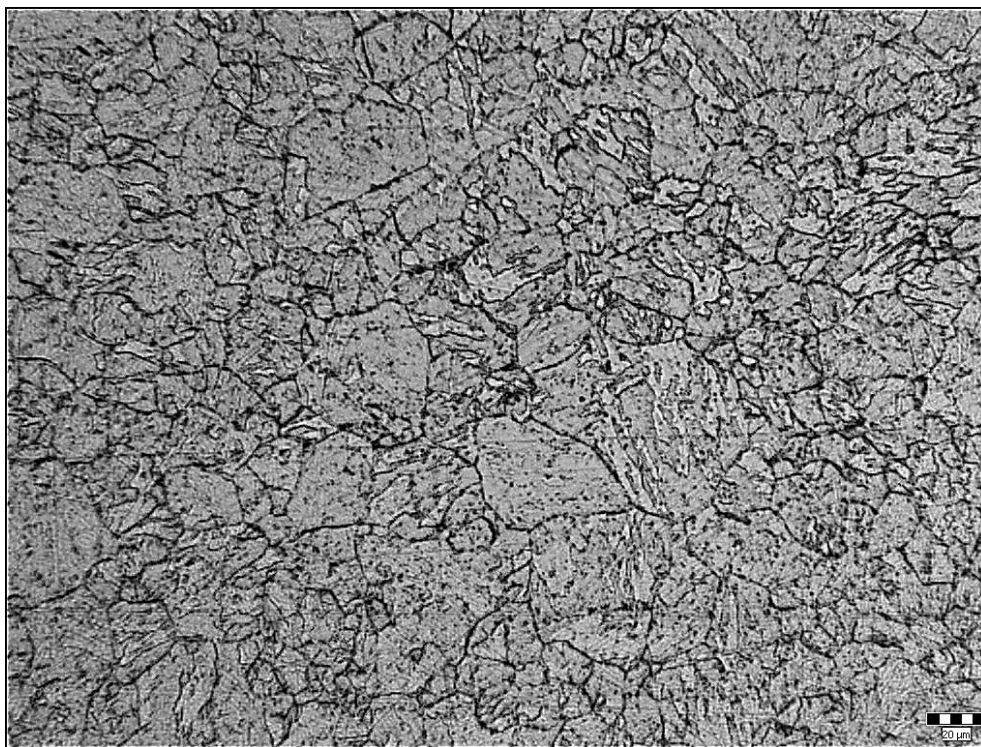


Obrázek 28: Makrostruktura svarového spoje oceli P24

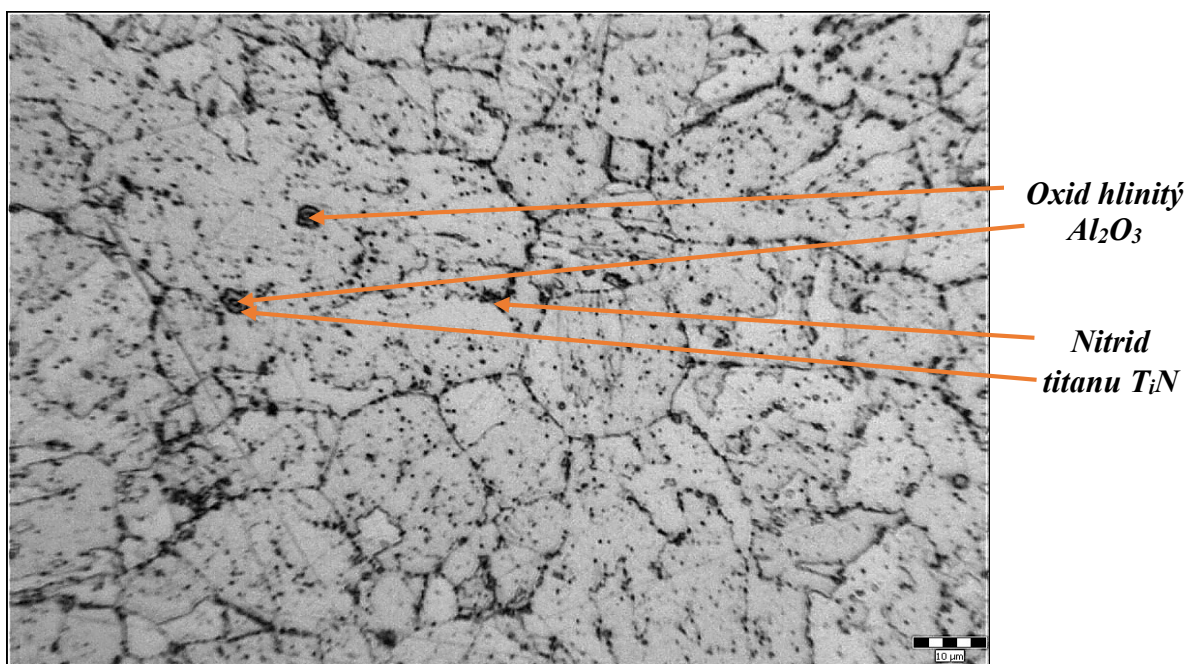
Na obrázku je možné pozorovat, že svarový spoj není bez vad. V oblasti svarového spoje se vyskytuje wolframový vměstek, který vznikl během svařování vlivem natavení wolframové elektrody, což je nežádoucí jev.

7. 2. 2. Mikroskopické šetření svarového spoje oceli P24

Mikroskopické šetření bylo provedeno pomocí světelné mikroskopie metodou kolmého řezu, pomocí vybavení na vybavení Neophot 21 za počítačové podpory Quick Photo Industrial 2. 2. Mikroskopická dokumentace je tvořena obrázky 29 až obrázky 39.



Obrázek 29: Dokumentace mikrostruktury základního materiálu, **dolní bainit**, M 1:200



Obrázek 30: Dokumentace mikrostruktury základního materiálu, **dolní bainit**, M 1:500

Na **obrázku 29 a obrázku 30** je možné pozorovat, že mikrostruktura trubky z oceli P24 tvořena silně popouštěným bainitem (struktura je značně rozpadlá).

Jedná se o tyto druhy přeměn:

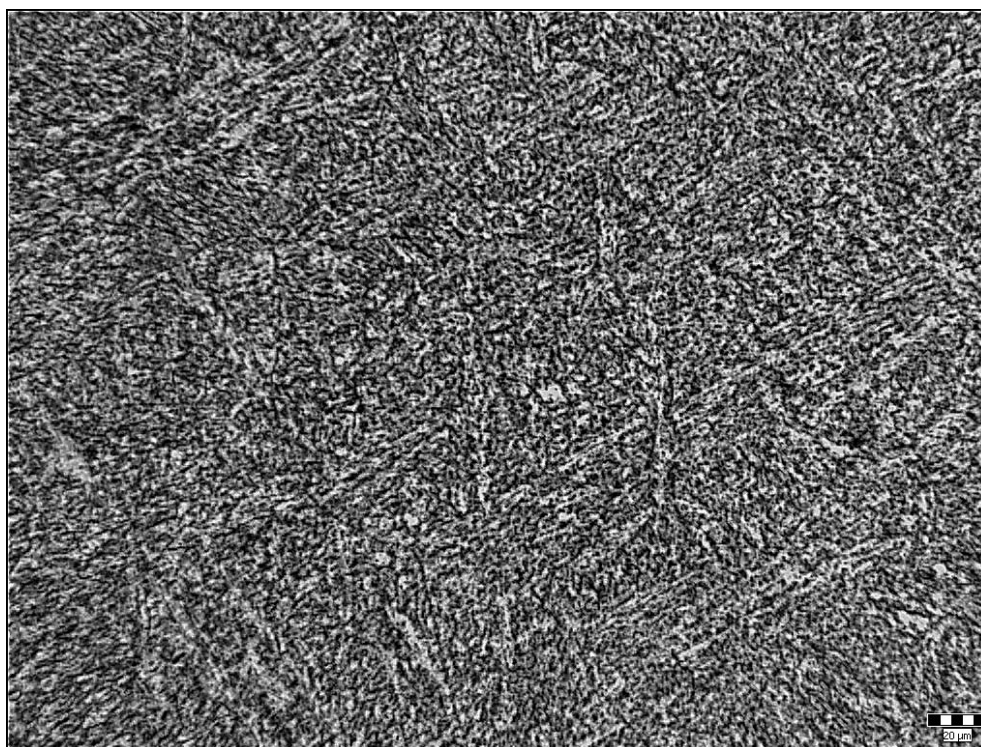
Bainitická přeměna - probíhá při rozpadu austenitu při nižších teplotách $500\text{ °C} \div 625\text{ °C}$.

Mechanismus tvorby bainitu se mění v závislosti na teplotě.

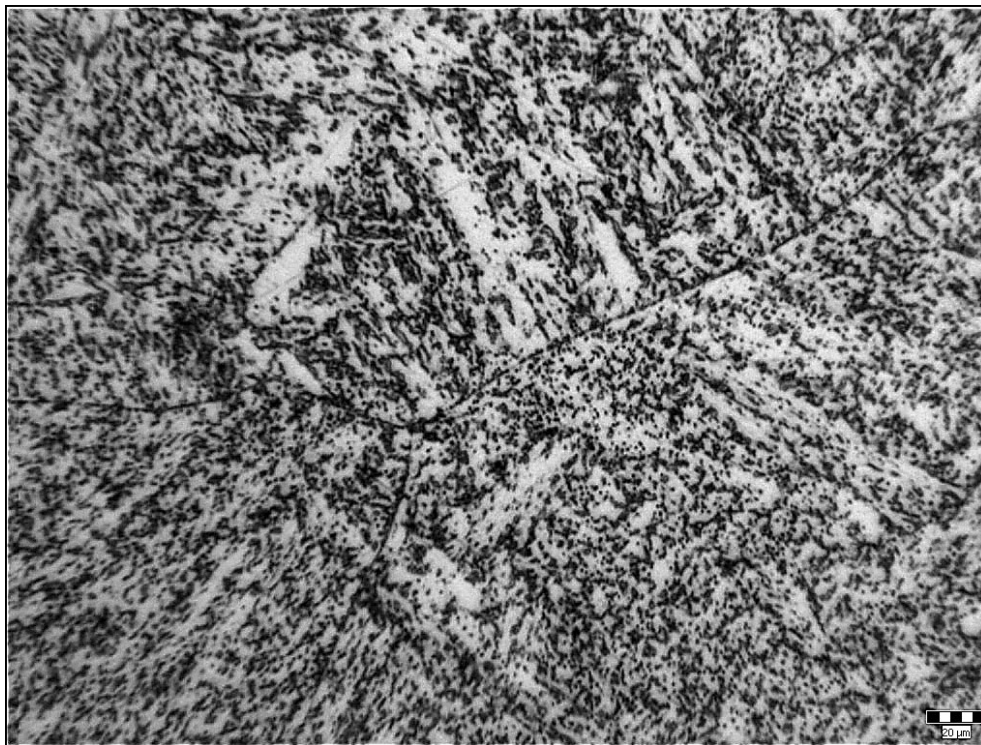
Na obrázcích se vyskytuje horní bainit a dolní bainit.

Horní bainit - vzniká při teplotě $350\text{ °C} \div 500\text{ °C}$, jeho struktura tvoří svazky hrubších jehlic bainitického feritu s podélně uspořádanými částicemi cementitu

Dolní bainit - vzniká při nižších teplotách nižších a je tvořenými tenkými deskami bainitického feritu více přesyceného uhlíkem, takže k precipitaci karbidů dochází převážně uvnitř desek. Je jemnější než horní bainit.

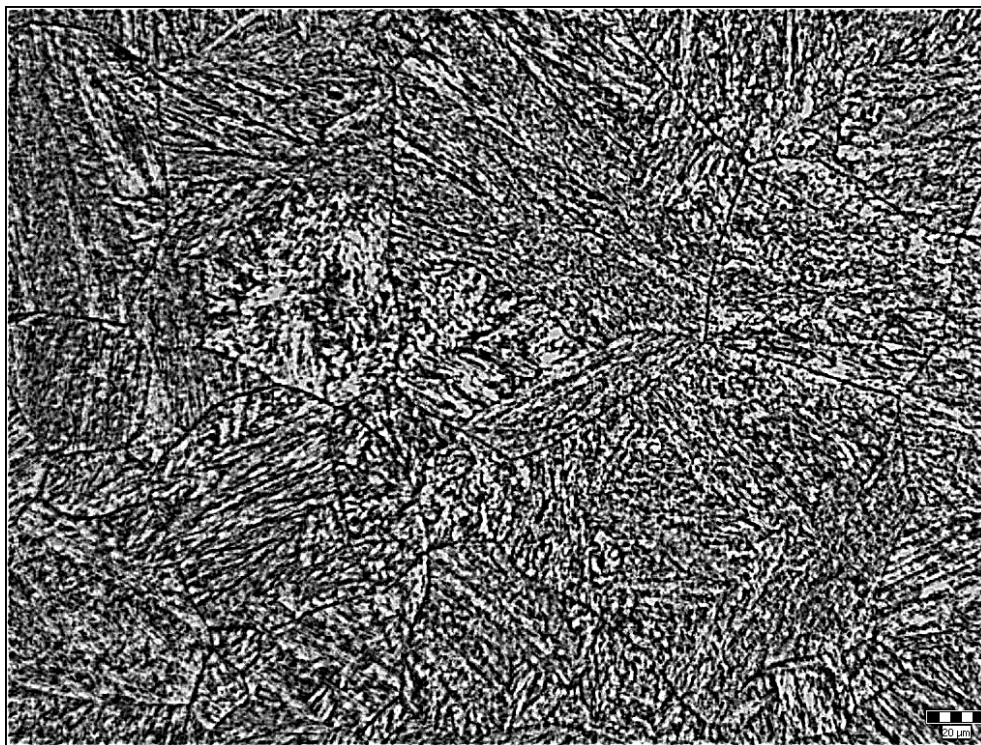


Obrázek 31: Dokumentace mikrostruktury svarového kovu, **horní bainit**, M 1:200



Obrázek 32: Dokumentace mikrostruktury svarového kovu, **horní bainit**, M 1:500

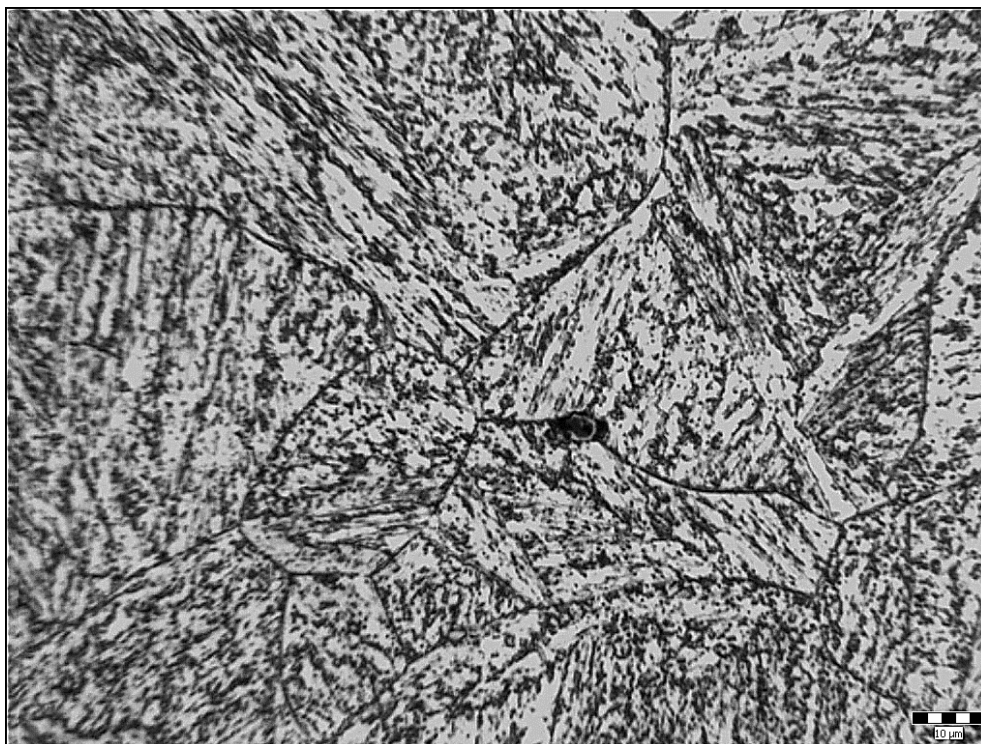
Na obrázku 31 a na zvětšeném obrázku 32 se jedná se o přehřátou oblast. Mikrostruktura svarového kovu je tvořena horní bainitem. Ve svarovém kovu se vyskytují hrubá zrna. Předpokládaná tvrdost $312 \div 317$ HV10.



Obrázek 33: Dokumentace mikrostruktury hranice z tavení, hrubé zrno, **horní bainit**,
M 1:200

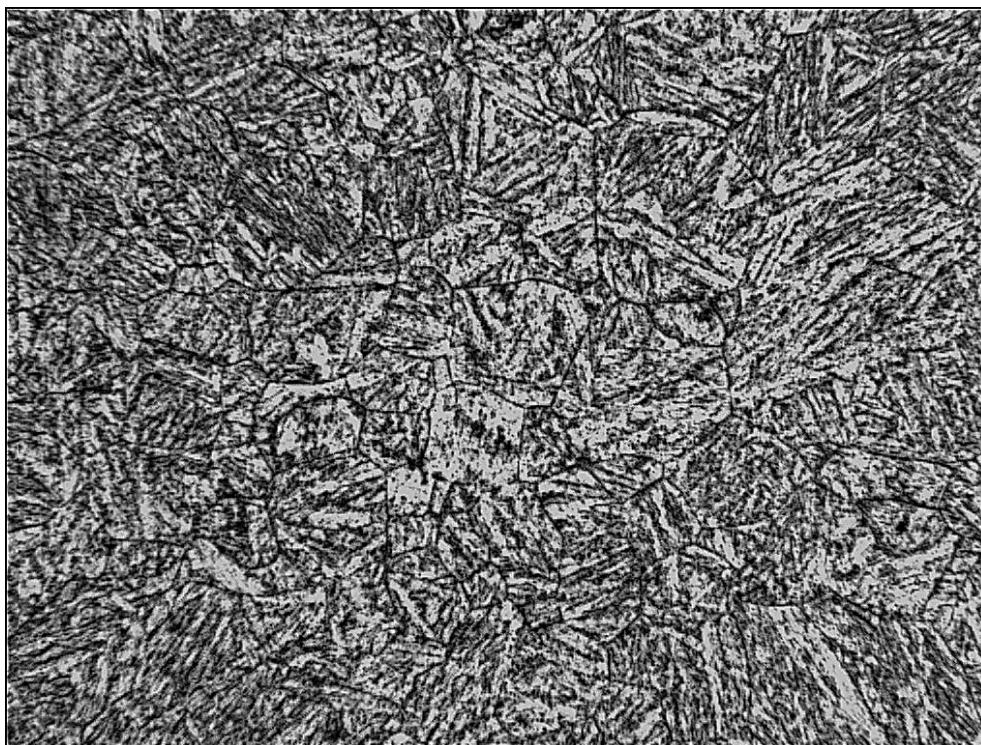
Na obrázku 33 se jedná se o oblast částečného natavení (oblast přehřátí). Mikrostruktura hrubozrnné zóny a hrubozrnné zóny pásma hrubého zrna je tvořena horní bainitem. Ve struktuře se vyskytují karbidy, nitridy titanu Ti a oxid hlinitý Al_2O_3 . Na obrázku se vyskytují vměstky.

Předpokládaná tvrdost $327 \div 333 \text{ HV}_{10}$.



Obrázek 34: Dokumentace mikrostruktury hranice z tavením, hrubé zrno a nitrid titanu TiN + oxid hlinitý Al₂O₃, **horní bainit**, M 1:500

Na **obrázku 34** se jedná se o přehřátou oblast. Na obrázku se vyskytuje oxid hlinitý Al₂O₃ a nitrid titanu TiN.



Obrázek 35: Dokumentace mikrostruktury pásma normalizace, hrubé zrno, **horní bainit**, karbidy, M 1:200

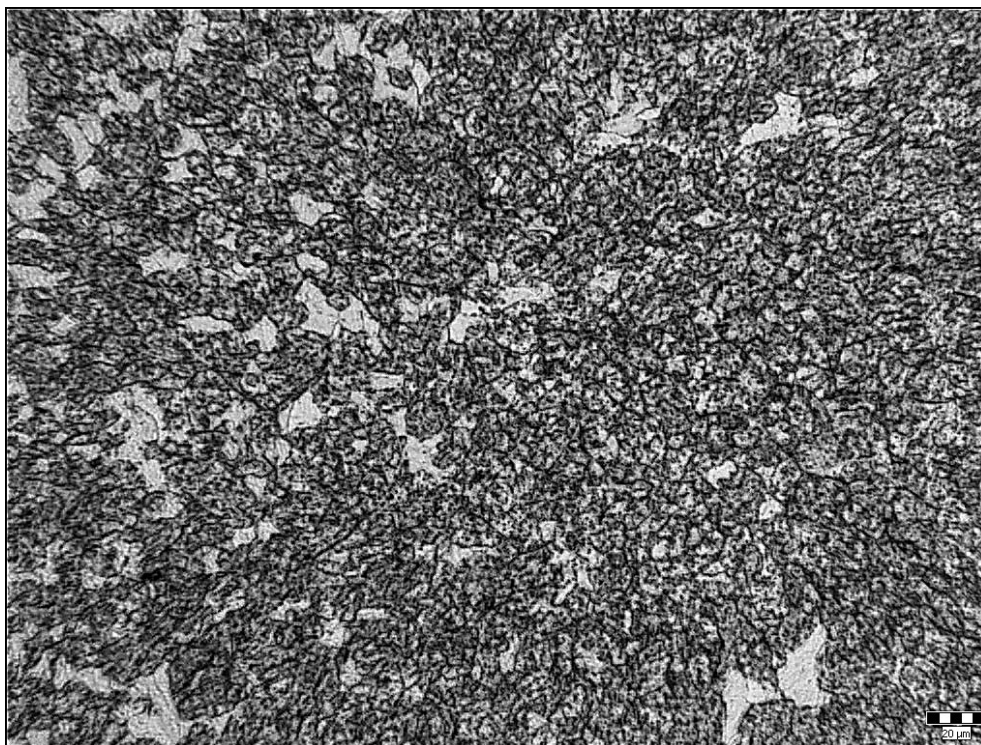
Na obrázku 35 se jedná se pásma normalizace (oblast částečné překrystalizace).

V oblasti $Ac_3 - Ac_1$ - základní materiál je mikrostruktura tvořena bainitem.

Předpokládaná tvrdost $198 \div 210$ HV10.

V oblasti Ac_3 se je mikrostruktura tvořena bainitem a feritem.

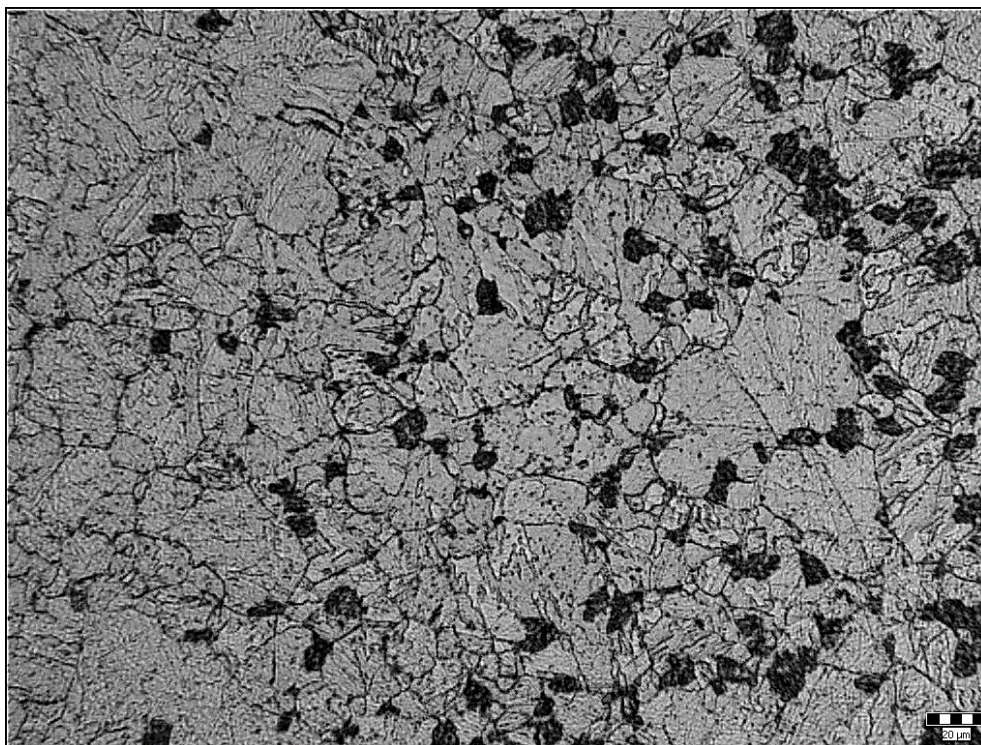
V oblasti Ac_1 je mikrostruktura tvořena bainitem + lamelárním perlitem.



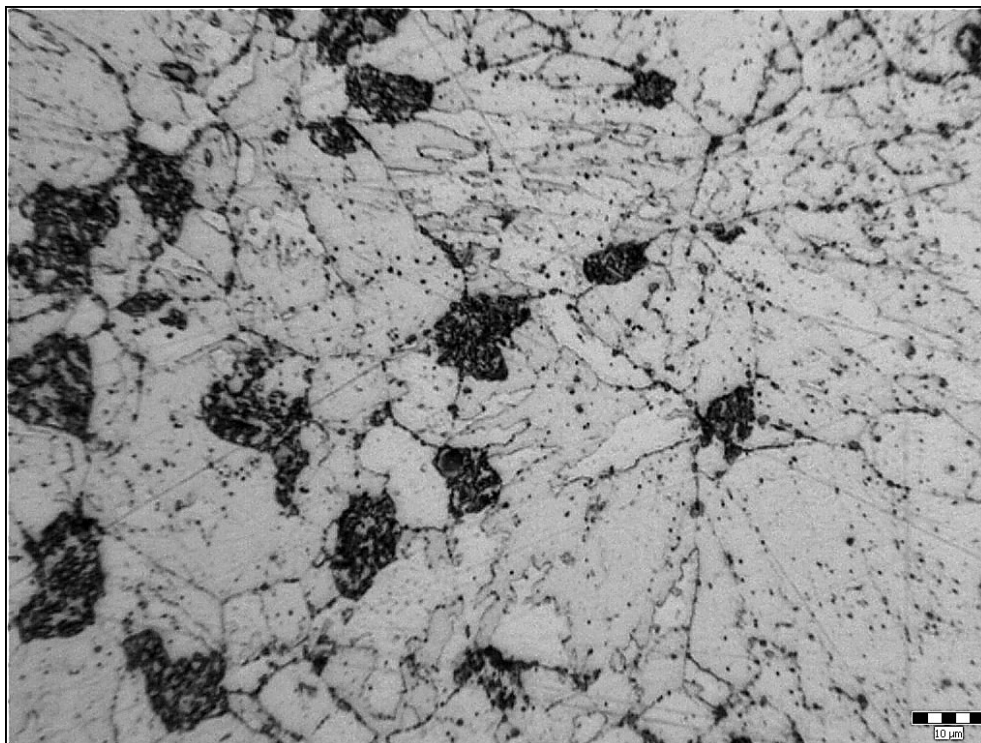
Obrázek 36: Snímek mikrostruktury oblasti Ac_3 a pásma normalizace, **ferit - dolní bainit**,
M 1:200

Na obrázku 36 se jedná se o pásma částečné překrystalizace (Ac_3). Mikrostruktura Ac_3 a pásma normalizace je tvořena bainitem. Na obrázku se vyskytují feritické desky. Jedná se feriticko - bainitickou strukturu.

Předpokládaná tvrdost $220 \div 292$ HV10.



Obrázek 37: Dokumentace mikrostruktury základního materiálu a oblasti Ac_1 , **dolní** bainit, karbidy a jemně lamelární perlit (troostit), M 1:200

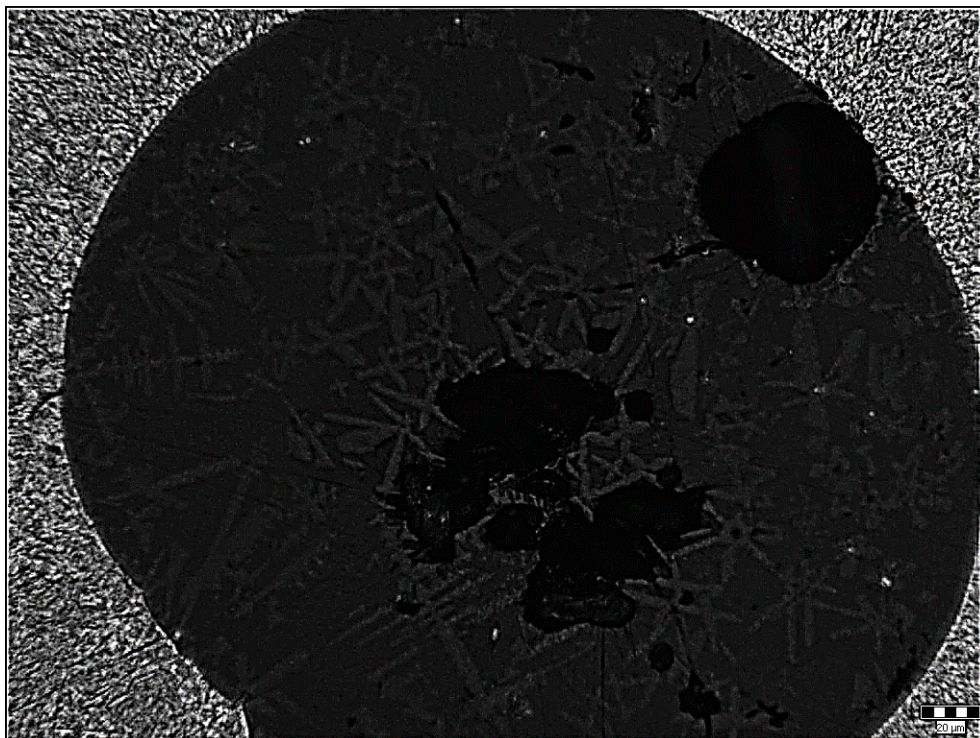


Obrázek 38: Dokumentace mikrostruktury základního materiálu a oblasti Ac_1 , **dolní** bainit, karbidy a jemně lamelární perlit (troostit), M 1:500

Na obrázku 37 a na zvětšeném obrázku 38 se jedná se o přehřátou oblast a vyskytuje se částečná překrystalizace Mikrostruktura základního materiálu a Ac_1 je tvořena dolním bainitem.

Ve struktuře se vyskytují karbidy, které jsou vyloučeny po hranici původního austenitického zrna.

Předpokládaná tvrdost $368 \div 309$ HV10.



Obrázek 39: Vada vyskytující ve svarovém kovu (anomálie svarového kovu), měřítko M 1:200

Na obrázku 39 je možné pozorovat vadu ve svarovém kovu, jedná se o dendrid (wolframový vměstek). Vada mohla vzniknout při svařování při svařování elektrodou, jako zbytek použité elektrody.

Struktura této vady je bainitická, vyskytuje se zde hrubé zrno v oblasti Ac_1 . Základ tvoří ferit a lamelární perlit.

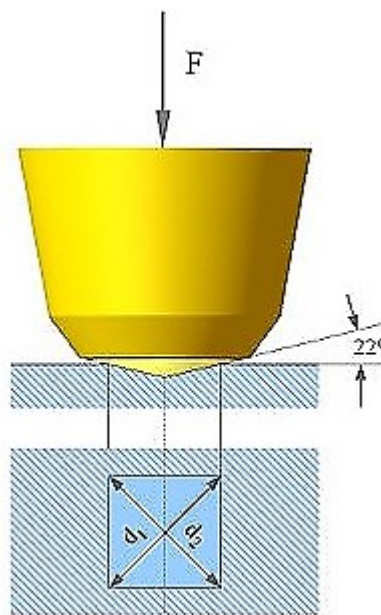
7. 2. 3. Měření tvrdosti dle Vickerse

Měření tvrdosti bylo provedeno na připraveném vzorku z oceli P24 podle norem ČSN EN ISO 9015 - 1 a ČSN EN ISO 6507 - 1. Tvrdost byla měřena podle Vickerse. Měření probíhalo dle normy ČSN EN 1043 - 1. Zkouška se provádí při teplotě okolí (23 ± 5 °C). Jednotlivé vpichy byly vedeny v linii 2 mm od horního a dolního okraje.

Zkouška tvrdosti podle Vickerse:

Tato zkouška patří mezi statické zkoušky tvrdosti materiálu. Princip spočívá ve vnikání zkušebního tělesa - indentoru - do zkoumaného materiálu a následného zjišťování míry deformace tohoto materiálu. Jako indentor se používá diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° , měřítkem tvrdosti materiálu jsou délky dvou úhlopříček vtisknutého jehlanu. Vickersova zkouška se označuje HV, je značně univerzální, lze ji použít na tvrdé i měkké materiály. Její výhodou je, že výsledná hodnota tvrdosti nezávisí na zatěžovací síle, jelikož vtisky jsou pro různé síly geometricky přibližně stejné.[14]

Na obrázku 23 je popsán postup zkoušky podle Vickerse



Obrázek 40: Schéma měření tvrdosti podle Vickerse [14]

7. 2. 4. Měření tvrdosti HV10

Naměřené hodnoty tvrdosti HV10 v horní okraji a v dolní oblasti svarového spoje. Vzdálenosti byly dodrženy 2 mm od jednotlivých okraji. Tabulky jsou rozděleny podle oblasti svarového spoje vždy z levé a pravé strany.

Naměřené hodnoty tvrdosti HV10:

Horní oblast svarového spoje

a)

Horní oblast okraje hranolu z oceli P24			
Levá strana hranolu			
	Základní	Tepelně	Svarový kov (SK)
	materiál (ZM)	ovlivněná oblast (TOO)	
Naměřené hodnoty tvrdosti HV10	194	206	314
	206	319	287
	194	Prům. hodnota 317	302

Tabulka 9: Naměřené hodnoty tvrdosti HV10 v horní oblasti svarového spoje z levé strany

Horní oblast okraje hranolu z oceli P24		
Pravá strana hranolu		
	Tepelně	Základní
	ovlivněná oblast (TOO)	materiál (ZM)
Naměřené hodnoty tvrdosti HV10	Prům. hodnota 309	201
	314	206
	281	213

Tabulka 10: Naměřené hodnoty tvrdosti HV10 v horní oblasti svarového spoje z pravé strany

U tepelně ovlivněné oblasti jsou první a poslední hodnoty vypočtená aritmetickým průměrem. Měření v této oblasti probíhalo u svarového kovu ve 3 oblastech.

V případě první tabulky jsou hodnoty: 287 HV10; 325 HV10; 339 HV10 (průměr 317 HV10)

V případě druhé tabulky jsou hodnoty: 306 HV10; 309 HV10; 312 HV10 (průměr 309 HV10)

Dolní oblast svarového spoje

b)

Dolní oblast okraje hranolu z oceli P24			
Levá strana hranolu			
	Základní	Tepelně	Svarový kov (SK)
	materiál (ZM)	ovlivněná oblast (TOO)	
Naměřené hodnoty tvrdosti HV10	203	309	262
	203	317	297
	202	Prům. hodnota 327	297

Tabulka 10: Naměřené hodnoty tvrdosti HV10 v dolní oblasti svarového spoje z levé strany

Dolní oblast okraje hranolu z oceli P24		
Pravá strana hranolu		
	Tepelně	Základní
	ovlivněná oblast (TOO)	materiál (ZM)
Naměřené hodnoty tvrdosti HV10	Prům. hodnota 330	201
	319	199
	268	207

Tabulka 10: Naměřené hodnoty tvrdosti HV10 v dolní oblasti svarového spoje z pravé strany

Hodnoty u tepelně ovlivněné oblasti jsou stejně jako u předchozí tabulky vypočtené aritmetickým průměrem

V případě první tabulky jsou hodnoty: 334 HV10; 342 HV10; 305 HV10 (průměr 327 HV10)

V případě druhé tabulky jsou hodnoty: 337 HV10; 323 HV10; 330 HV10

(průměr 330 HV10)

8. Hodnocení a závěr

Cílem bakalářské práce bylo hodnotit svarové spoje oceli P24. Pro tyto účely bylo na připraveném vzorku z oceli P24 provedeno měření makrostruktury, mikrostruktury a měření tvrdosti.

V teoretické části je popsána problematika oceli P24. V úvodu jsou zde uvedeny typické vlastnosti oceli P24, následuje charakteristika oceli P24. Dále jsou v této části zde informace o mikrostruktuře a creepových vlastnostech oceli P24. Závěr teoretické části se zabývá strukturou svarového spoje a teplotními režimy zpracování.

V experimentální části je uveden typ základního materiálu, který byl použit pro svařování. Dále jsou uvedeny svařovací parametry jako svařovací proud, svařovací rychlost, svařovací proud. Poté je uvedena teplota interpass a teplota předehřevu. Následuje příprava a realizace metalografického šetření a tabulka s hodnotami naměřených u tvrdosti v horní a dolní oblasti svarového spoje. Dále navazuje dokumentace vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury. Nakonec je uvedena vada ve svarovém kovu, která se vyskytla při procesu svařování. Závěrem experimentální části jsou tabulky s naměřenými hodnotami tvrdosti HV10. Výsledky naměřených hodnot tvrdosti HV10 jsou zaznamenány ve dvou diagramech pro horní a dolní oblast okraje, které jsou uvedeny v příloze.

Výsledek šetření mikrostruktury a makrostruktury svarového spoje oceli P24 dokumentuje, charakter strukturních změn probíhajících vlivem teplotní zátěže procesu svařování. Ocel P24 je základní struktury baintické. Na základě mikrostrukturního šetření můžeme říci, že v oblasti částečného natavení se vyskytuje horní bainit. V oblasti normalizace se vyskytuje horní bainit. V oblasti Ac_3 je dokumentován výskyt feritu - dolního bainitu. V oblasti Ac_3 a Ac_1 se vyskytuje horní bainit.

V případě makroskopického šetření byla zjištěna anomálie svarového kovu viz. obrázek 28, podpora mikroskopické dokumentace obrázek 39 umožňuje stanovit její charakter jako wolframový vměstek. U měření tvrdosti HV10 jsou výsledkem měření dva grafy pro horní a dolní oblast okraje vzorku. Tyto grafy byly porovnány s přípustnou hodnotou tvrdosti 350 HV10. Z grafů je možné pozorovat, že v tepelně ovlivněné oblasti dosahují hodnoty tvrdosti nejvyšších hodnot. Nejmenší hodnoty jsou u základního materiálu. V tepelně ovlivněné oblasti dochází ke změně mikrostruktury v důsledku působení zdroje tepla při svařování. Proto jsou zde hodnoty největší. V případě svarového kovu dochází ke vzniku tavením základního a přídavného materiálu.

9. Seznam použité literatury

- [1] PECHA, J., PELEŠ, O., HAKL, J., VLASÁK, T. Skúsenosti so zvaráním ocele P23. In. Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování. Sborník přednášek 19. 09. - 21. 09. 2007. Ostrava: VŠB – TU. Český svářečský ústav s.r.o., 2007. s. 125 – 137, ISBN 978-80-248-1573-2
- [2] DI GIANFRANCESCO, A. et al. RESEARCH FUND FOR COAL & STEEL. Applications of Advanced Low-alloy Steels for New High-temperature Components [online]. Luxembourg, 2009, 142 s. [cit. 2012-04-01].
Dostupné z: <observatorio.aimme.es/otea_document.asp?id=9455&n=1>
- [3] VOLF, O. [online] Ověření vlivu tepelného zpracování na vlastnosti progresivních žárupevných ocelí. Verification of heat treatment on properties of progressive heat resisting steels. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, ústav strojírenské technologie. 2009. 62 s. Diplomová práce. vedoucí: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
Dostupné z:
<http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18215>
- [4] PECHA, J. Zváranie moderných žiarupevných ocelí pre energetické zariadenia. Bratislava: STU Bratislava, 2007. Str. 136 s.
- [5] MRÁZ, L., BERNASOVSKÝ, P., ZIFČÁK, P., BRZIAK, P., KOTORA, J., KRAJČI, D., MRÁZ, M., PECHA, J. Skúsenosti s úžitkovými vlastnosťami ocele P24. Experience with utility properties of T24 steel. Bratislava: Energoinvest s. r. o., 2012. str. 105 - 114
- [6] The T23/T24 Book. Vallourec & Mannesman tubes. 2002

- [7] TOMEČEK, [online]. J. Sekundární vytvrzování svarového spoje oceli P24. Secondary Hardening of Welded Joint of T24 Steel. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní, katedra mechanické technologie. 2011. 65 s. Diplomová práce. vedoucí: doc. Ing. Petr Mohyla, PhD. *Dostupné z:* <https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle//10084/88063/TOM483_FS_N2301_2303T002_2011.pdf?sequence=1>
- [8] KUBON, Z. Aplikace a vlastnosti svar z oceli T24 pro membránové stěny. Ostrava: Materiálový a Metalografický a výzkum s. r. o., 2010, str. 100 – 104
- [9] JECH, D. [online] Struktura a vlastnosti svarového spoje rotorových ocelí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, ústav strojírenské technologie. 2012. str. 62. Diplomová práce. vedoucí: prof. Ing. Rudolf Foret, CSc. *Dostupné z:* <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55567>
- [10] HLAVATÝ, I. [online]. Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou. *Dostupné z:* <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/05-111.pdf>>
- [11] SVARBAZAR [online]. Svařování pod tavidlem. *Dostupné z:* <<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2009010801>>
- [12] HLAVATÝ, I. [online]. Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu. *Dostupné z:* <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/09-141.pdf>>
- [13] T- PUT Histore und Markenname [online]. *Dostupné z:* <http://www.t-put.com/pdf/DE_Haendler_0809.pdf>
- [14] Zkouška tvrdosti podle Vickerse [online]. *Dostupné z:* <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka_tvrdosti_podle_Vickerse>

[15] Svařitelnost některých technických materiálů a volba přídatných materiálů [online]. *Dostupné z:*

<http://bcz.vamberk.eu/CD_CZ_5_2011/PDF/1_pridavne_svarovaci/N/N1_svaritelnost_materialu.pdf>

[16] Air Liquide >Gas Encyclopedia [online]. *Dostupné z:*

<<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?GasID=3&LanguageID=17&CountryID=33>>